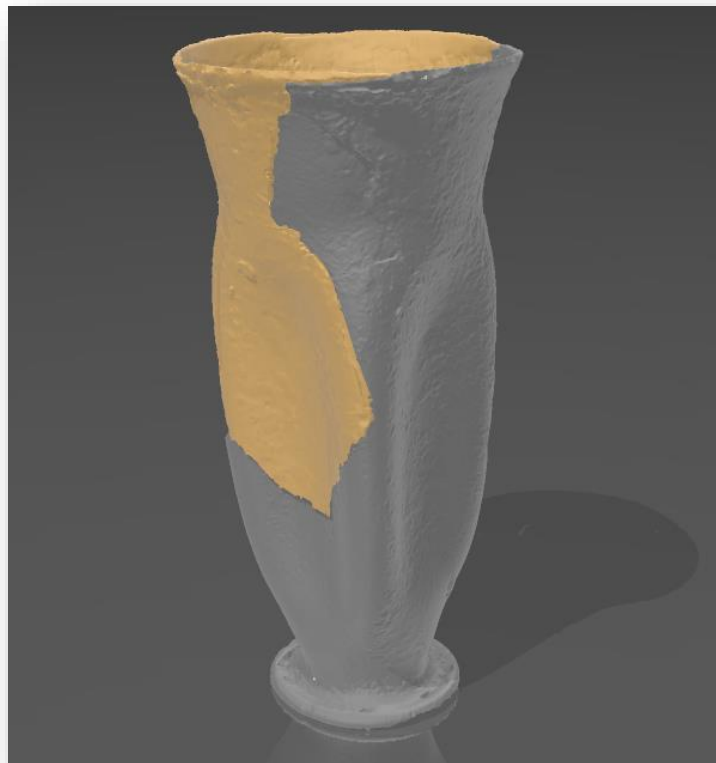




ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

Εφαρμογές τρισδιάστατης απεικόνισης
και εκτύπωσης σε αντικείμενα
πολιτισμικής κληρονομιάς.



Ευάγγελος Σούλης

AM: 222017071

Επιβλέπων: Καθ. Θεόδωρος Γκανέτσος

Αιγάλεω 2022

Η παρούσα διπλωματική εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την τριμελή εξεταστική επιτροπή, η οποία ορίστηκε από την Γ.Σ. του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, σύμφωνα με το νόμο και τον εγκεκριμένο Οδηγό Σπουδών του τμήματος.

Επιτροπή Αξιολόγησης:

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	ΥΠΟΓΡΑΦΗ
ΓΚΑΝΕΤΣΟΣ ΘΕΩΔΩΡΟΣ	
ΛΑΣΚΑΡΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ	
ΠΑΠΑΚΙΤΣΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Σούλης Ευάγγελος του Πασχάλη, με αριθμό μητρώου 222017071 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο δηλών,

Σούλης Ευάγγελος



Ευχαριστίες

Ξεκινώντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Θεόδωρο Γκανέτσο για την καθοδήγηση και υποστήριξη που παρείχε καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, όπως και τον καθηγητή Δρ. Αντρέα Κάνταρο για την βοήθεια του στην έρευνα των τεχνολογιών που αναπτύχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας και την μεταλαμπάδευση των γνώσεων του. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα αξιότιμα μέλη της εξεταστικής επιτροπής Δρ. Νικόλαο Λάσκαρη και Δρ. Ευάγγελο Παπακίτσο που με τίμησαν με την συμμετοχή τους. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές και φίλους μου για την αμερόληπτη βοήθεια και στήριξη τους καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου, όπως και την οικογένεια μου για την κατανόηση και την στήριξη της.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τις εφαρμογές της τεχνολογίας της τρισδιάστατης απεικόνισης και της τεχνολογίας της τρισδιάστατης εκτύπωσης σε αντικείμενα πολιτισμικής κληρονομιάς. Συγκεκριμένα στα ακόλουθα κεφάλαια αναλύονται οι τεχνικές συντήρησης και συμπλήρωσης που εφαρμόζονται από την αρχαιότητα ως σήμερα από τους αρχαιολόγους, παραδείγματα εφαρμογών των τεχνολογιών της τρισδιάστατης απεικόνισης και εκτύπωσης σε αντικείμενα πολιτισμικής κληρονομιάς και οι διαφορετικές τεχνολογίες τρισδιάστατων σαρωτών και εκτυπωτών με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

Στα πλαίσια της εργασίας πραγματοποιήθηκε η σάρωση, η ψηφιακή αναπαράσταση, η επεξεργασία και η συμπλήρωση ενός γυάλινου σπασμένου αγγείου από τον αρχαιολογικό χώρο της Αταλάντης. Στην συνέχεια με την βοήθεια 3D εκτυπωτή δημιουργήθηκε ακριβές αντίγραφο του εκθέματος αλλά και κομμάτι συμπλήρωσης από πολυλακτίδιο (PLA) με σκοπό την τοποθέτηση του στο πρωτότυπο έκθεμα. Η ανάλυση των δύο τεχνολογιών καθώς και η εξοικείωση με αυτές μέσω του πειραματικού μέρους οδήγησαν σε συμπεράσματα αναφορικά με την χρησιμότητά τους στον τομέα της αρχαιολογίας και της προοπτικές που παρουσιάζουν για το μέλλον.

Abstract

This thesis deals with the applications of 3D imaging technology and 3D printing technology in cultural heritage objects. Specifically, the following chapters analyze the preservation and completion techniques applied from antiquity to the present day by archaeologists, examples of applications of 3D scanning and printing technologies on cultural heritage objects, and the different technologies of 3D scanners and printers with their advantages and disadvantages.

As part of the work, the scanning, digital representation, processing and completion of a broken glass vessel from the archaeological site of Atalanti was carried out. Then, with the help of a 3D printer, an exact copy of the exhibit was created, as well as a filler piece made of polylactide (PLA) in order to place it on the original exhibit. The analysis of the two technologies as well as familiarization with them through the experimental part led to conclusions regarding their usefulness in the field of archeology and the perspectives they present for the future.

Πίνακας περιεχομένων:

Ευχαριστίες	4
Περίληψη	5
Abstract.....	5
Πίνακας Εικόνων.....	7
Θεωρητικό υπόβαθρο.	12
1. Συντήρηση και Συμπλήρωση Αντικειμένων Πολιτισμικής Κληρονομιάς.	12
1.1. Πρότυπο διαδικασίας της συντήρησης.	13
1.2. Τεχνικές και Υλικά συμπλήρωσης – συγκόλλησης από τα αρχαία χρόνια ως και τώρα.	14
1.3. Υλικά που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες συμπλήρωσης από την αρχαιότητα έως σήμερα.....	23
1.4. Παραδείγματα τρισδιάστατης αναπαράστασης, συμπλήρωσης και εκτύπωσης έργα πολιτισμικής κληρονομιάς.....	35
1.4.1. Συμπλήρωση δύο ακέφαλων γύψινων γλυπτών.....	35
1.4.2. Συμπλήρωση προσώπου ρωμαϊκού κράνου.....	38
1.4.3. Συμπλήρωση κεραμικού λέοντα.....	41
1.4.4. Ανακατασκευή και συμπλήρωση κατεστραμμένου τμήματος λίθινης προτομής.	42
2. Ψηφιοποίηση Αντικειμένων Πολιτισμικής Κληρονομιάς.....	45
Βασικές κατηγορίες τρισδιάστατων σαρωτών (3D scanners).	46
2.1. Τρισδιάστατοι Σαρωτές Επαφής.....	46
2.2. Ανέπαφοι Τρισδιάστατοι Σαρωτές.	47
2.2.1. Σαρωτές τριγωνισμού με ακτίνες λέιζερ (triangulation)	48
2.2.2. Σαρωτές Δομημένου φωτός.	55
2.2.3. Σαρωτές στερεοσκοπικής φωτογράφισης (Στερεοφωτογράφιση)	56
2.2.4. Σαρωτές με τεχνική φωτοσκίασης.....	59
2.2.5. Σαρωτές φωτομετρικής στερεοσκοπικής φωτογράφισης.....	60
2.2.6. Σαρωτές με τεχνική μεταβαλλόμενης εστίασης.....	61
3. Τρισδιάστατη αναπαράσταση Αντικειμένων Πολιτισμικής Κληρονομιάς	64
3.1. Γενική Περιγραφή.	64
3.2. Υλικά και Τεχνικές.....	65
3.2.1. Στερεολιθογραφία/Stereolithography (SLA)	67
3.2.2. Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ/Selective Laser Sintering (SLS)	69
3.2.3. Μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης/Fused Deposition Modeling (FDM)	72
3.2.4. Τρισδιάστατη εκτύπωση/Three Dimensional Printing (3DP)	76

3.2.5.	Κατασκευή πολυστρωματικών αντικειμένων/Laminated Object Manufacturing (LOM)	78
3.2.6.	Solid Ground Curing (SGC)	81
3.2.7.	Multi Jet Modelling (MJM)	83
4.	Πειραματικό μέρος	86
4.1.	Διαδικασία Ψηφιοποίησης γυάλινου αγγείου	86
4.1.1.	Τρισδιάστατος σαρωτής του Πειράματος	86
4.1.2.	Μέθοδος Σάρωσης και τεχνικές	88
4.1.3.	Επεξεργασία των δεδομένων του σαρωτή	90
4.2.	Διαδικασία ψηφιακής επεξεργασίας και ανακατασκευής του γυάλινου αγγείου	94
4.2.1.	Τεχνική συμπλήρωσης/Ανακατασκευή Προτύπου	94
4.2.2.	Δημιουργία Κομματιού Συμπλήρωσης	97
4.3.	Διαδικασία Εκτύπωσης και αναπαράστασης γυάλινου αγγείου	99
4.3.1.	Τεχνολογία 3D εκτυπωτή και υλικά	99
4.3.2.	Παράμετροι Εκτύπωσης	100
5.	Συμπεράσματα	106
6.	Βιβλιογραφία	107

Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1	Παραδείγματα της παλαιότερης κεραμικής στην Άνω Μεσοποταμία στην περιοχή Tell Sabi Abyad περίοδος 7000-6700 π.Χ. (Τα κεραμικά αγγεία εκθέτονται αυτή την στιγμή στο Εθνικό Μουσείο Αρχαιοτήτων στο Leiden στα επίπεδα A16-A11)	15
Εικόνα 2	Μεταγενέστερο δοχείο που ακολουθεί την προϊστορική μέθοδο επισκευής σύνδεσης με σύρμα ως τέχνη. (πηγή)	16
Εικόνα 3	Σχηματική αναπαράσταση της πρώτης μεθόδου σύνδεσης θραυσμάτων με τρύπες, που συνδέονται με δερμάτινο σχοινί ή κορδόνι. (Dooijes R., 2007)	16
Εικόνα 4	Σχηματική αναπαράσταση τεχνικής στην οποία χρησιμοποιείται μεταλλικό σύρμα αντί για οργανικά υλικά	17
Εικόνα 5	Σχηματική αναπαράσταση τεχνικής στην οποία τοποθετούνται σύνδεσμοι μόλυβδου σε σχήμα Π (Dooijes R., 2007)	17
Εικόνα 6	Αγγείο με μεταλλικό σκελετό με σκοπό την στήριξη του Πηλού συμπλήρωσης (Koob, 1998)	18
Εικόνα 74	Δοχείο της περιοχής Jebel Aruda (3200 ως 3000π.Χ). Ύψος 90 εκ., εκθέτεται στο «Εθνικό Μουσείο Αρχαιοτήτων στο Leiden». (Dooijes, 2007)	19
Εικόνα 8	Συμπλήρωση με ζωική κόλλα. (Koob, 1998)	20
Εικόνα 9	Ελληνικό Αγγείο του οπίου μέρος έχει συμπληρωθεί από τμήμα αλλού παρόμοιου αγγείου. (Koob, 1998)	21

Εικόνα 10 Ελληνικού αγγείου του οποίου το μεγαλύτερο τμήμα έχει καλυφθεί με κομμάτια από εντελώς διαφορετικά αγγεία, χρησιμοποιώντας το αρχικό μόνο ως βάση αναφοράς. (Koob, 1998)	21
Εικόνα 11 Θραύσμα αγγείου με υπογεγραμμένη τη φράση «in Roma l'ann 1837» (Koob, 1998)	22
Εικόνα 12 Συμπληρωμένο αγγείο με κομμάτι φτιαγμένο από την αρχή με σκοπό τη μίμηση του αρχικού μοτίβου. (Arthur M. Sackler Gallery, S 1987.85) (Koob, 1998).....	22
Εικόνα 13 Βάζο με προέλευση την Συρία. Οι κολλήσεις έχουν γίνει με φυσικά κεριά και οι συμπληρώσεις με ανακατασκευασμένα κομμάτια όπου χρωματίστηκαν με χρώμα πράσινο. (Gallery of Art Freer, F 09.125) (Koob, 1998)	24
Εικόνα 14 Γομαλάκα σε μορφή αλοιφής που χρησιμοποιείται ώστε να συμπληρωθούν κενά ανάμεσα σε κομμάτια αγγείου. (Koob, 1998).....	25
Εικόνα 15 Αγγείο ελληνικής προέλευσης συμπληρωμένο με χρώματα που έχουν βάση τη γομαλάκα. (Koob, 1998).....	25
Εικόνα 16 Επίδεσμοι εμπλουτισμένοι με ζωική κολλά που δρούσε ως συμπλήρωμα σε αγγείο (Koob, 1998)	26
Εικόνα 17 Κομμάτι αγγείου με παρουσία πολυεστερικής ρητίνης και ίνες γυαλιού (Koob, 1998). ...	28
Εικόνα 18 Αγγείο στο οποίο έχουν γίνει κολλήσεις με αλοιφή ΑJK στις οποίες δεν έχουν παρατηρηθεί χρωστικές (Koob, 1998).	29
Εικόνα 19 Δημιουργία καλουπιού από σιλικόνη από αντίστοιχο τμήμα του αντικειμένου. (Λαμπρόπουλος, 1996).....	30
Εικόνα 20 Τελικό αποτέλεσμα, έπειτα από τη χύτευση γύψου στο καλούπι σιλικόνης (Λαμπρόπουλος, 1996).	31
Εικόνα 21 Στις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε την τεχνική της περιστροφής. Τα συνθετικά υλικά έχουν έναν πυρήνα που μπορεί να προσαρμοστεί στον κατακόρυφο άξονα. Τα υλικά διαμορφώνονται περιστρέφοντας το ανακατασκευασμένο προφίλ (Baron, 1988).	34
Εικόνα 22: Η μέτρηση και η αναπαραγωγή των διαμέτρων του χείλους από υπάρχοντα θραύσματα μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με το αρχικό μέγεθος και σχήμα ενός αγγείου. Αυτές οι πληροφορίες είναι χρήσιμες για μελλοντική χρήση ώστε να δημιουργηθεί ένα πιο ακριβές καλούπι. (Baron, 1988).	34
Εικόνα 23: Αριστερά βλέπουμε τις μετρήσεις των αποστάσεων από τα διατηρημένα κελύφη που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία φορμών από τις περιοχές: 1) χείλος, 2 και 3) σώμα και 4) βάση. Δεξιά βλέπουμε, το αγγείο του Ευφρονίου «Κρατήρας Κύκνος». Οι εργασίες συντήρησης ολοκληρώθηκαν με τη μέθοδο της περιστροφής από ένα φύλλο πλεξιγκλάς (Baron, 1988) (Γεωργάκη, 2012).	34
Εικόνα 24 Τα δύο ακέφαλα χερουβείμ στον χώρο λατρείας του παρεκκλησίου της εκκλησίας του San Martino dall'Argine πιστεύεται ότι χρονολογούνται από τον 16ο αιώνα. (Bigliardi, 2014)	36
Εικόνα 25 Τα τρισδιάστατα μοντέλα υπάρχοντος κεφαλιού και ημιτελούς σώματος ενός από τα δύο χερουβείμ από τη διακόσμηση. Το μοντέλο στη δεξιά φωτογραφία είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού των άλλων δύο φωτογραφιών. (Bigliardi, 2014)	36
Εικόνα 26 Το δεξί χερουβείμ πριν και μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας (Bigliardi, 2014)....	37
Εικόνα 27 Το αριστερό χερουβείμ πριν και μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας (Bigliardi, 2014).	37
Εικόνα 28 Προσωπείο Ρωμαϊκού κράνους και το εκτυπωμένο κομμάτι συμπλήρωσης του (Arnoldas, 2015).	38
Εικόνα 29 Διαδικασία σάρωσης του Ρωμαϊκού προσωπείου (Arnoldas, 2015).	39

Εικόνα 30: Το προσωπείο και το πληρωτικό εκτυπωμένο αντικείμενο τοποθετημένα έτσι ώστε να σημειωθούν τα μέρη που θα αφαιρεθούν. (Arnoldas, 2015).....	40
Εικόνα 31 Το τελικό προϊόν μετά την κόλληση του πληρωτικού εκτυπωμένου αντικειμένου και την βαφή του. (Arnoldas, 2015).....	40
Εικόνα 32 Τρισδιάστατη απεικόνιση των σαζόντων τμημάτων του κεραμικού λέοντα (JOE, 2012)...	41
Εικόνα 33: Τελικό εκτυπωμένο αντίγραφο του λέοντα (JOE, 2012).	42
Εικόνα 34 Διαδικασία σάρωσης του τελικού αντιγράφου (JOE, 2012).....	42
Εικόνα 35 Η ταφική προτομή του ανδρικού ομοιώματος μετά τους βανδαλισμούς (Valentina Di Donato, 2017).	43
Εικόνα 36 Μεγεθηνση του κατεστραμμένου τμήματος του ομοιώματος (Valentina Di Donato, 2017).	43
Εικόνα 37 Τα συμπληρωμένα γλυπτά έπειτα από την αποκατάσταση. Στην οθόνη μπορούμε να αντικρίσουμε την τρισδιάστατη αναπαράσταση την ανδρικής φιγούρας (Benedict, 2015).....	44
Εικόνα 38 Αριστερά παρατηρούμε τους τοποθετημένους μαγνήτες στην επιφάνεια του γλυπτού και δεξιά βλέπουμε το ολοκληρωμένο αποτέλεσμα με την προσθήκη του εκτυπωμένου πληρωτικού (Benedict, 2015).....	44
Εικόνα 39 Φορητός σαρωτής ακριβείας τριών διαστάσεων. (Συμεωνίδης, 2007).....	46
Εικόνα 40 Σαρωτής ακριβείας τριών διαστάσεων τύπου γέφυρας. (Συμεωνίδης, 2007)	47
Εικόνα 41 Ανέπαφος σαρωτής τριών διαστάσεων. (πηγή).....	48
Εικόνα 42 Αναπαράσταση της λειτουργίας ενός σαρωτή με σύστημα μονού σημείου (Παυλίδης, et al., 2014).	50
Εικόνα 43 Νόμος των συνημιτόνων (πηγή).....	50
Εικόνα 44 Παράδειγμα ακτίνας λέιζερ εκτός εστίασης λόγω της λανθασμένης απόστασης από το αντικείμενο (FARIN, 1993).....	51
Εικόνα 45 Σωστή ρύθμιση της εστίασης της δέσμης λέιζερ στο αντικείμενο επιτυγχάνοντας την μέγιστη ανάλυση (FARIN, 1993).	52
Εικόνα 46 Μετρό της διάθλασης της δέσμης λέιζερ ανά τον όγκο του αντικειμένου που θα σαρωθεί (Beraldin, 2004).....	53
Εικόνα 47 Στο σχήμα a παρατηρούμε την ανάκλαση της δέσμης λέιζερ σε λεία επιφάνεια. Στο σχήμα b παρατηρούμε την ανάκλαση της δέσμης λέιζερ σε τραχύ επιφάνεια, φαινόμενο που προκαλεί θόρυβο στις μετρήσεις του σαρωτή (J.Vass, et al., 2008).....	54
Εικόνα 48 Οι εικόνες αποτυπώνουν την διαδικασία σάρωσης ενός αντικειμένου με 3D scanner δομημένου φωτός. (Εικόνες από πείραμα που διεξάχθηκε στο εργαστήριο blue.lab.).....	55
Εικόνα 49 Επιπολικό επίπεδο και στερεοσκοπική αντιστοίχιση (Παυλίδης, et al., 2014).	57
Εικόνα 50 Σχεδιάγραμμα της διαδικασίας δημιουργίας ενός χάρτη βάθους (Παυλίδης, et al., 2014).	57
Εικόνα 51 Βήματα επεξεργασίας και αποτύπωσης τρισδιάστατου αντικειμένου με την διαδικασία της στερεοφωτογράφισης (Παυλίδης, et al., 2014).	58
Εικόνα 52 Αποτελέσματα της μεθόδου της φωτομετρικής στερεοσκοπικής φωτογράφισης και σύγκριση της με σαρωτή τριγωνισμού με ακτίνες λέιζερ (Παυλίδης, et al., 2014).	61
Εικόνα 53 Σχεδιάγραμμα αποτύπωσης της μεθόδου μεταβαλλόμενης εστίασης (Παυλίδης, et al., 2014).	61
Εικόνα 54 Φωτογραφίες με εστίαση σε διαφορετικά βάθη πεδίου (Favaro, 2002).	62
Εικόνα 55 Το αποτέλεσμα της τρισδιάστατης αποτύπωσης στα αριστερά και ο χάρτης βάθους στα δεξιά (Favaro, 2002).	63

Εικόνα 56 Το τελικό αποτυπωμένο μοντέλο σε τρεις διαστάσεις (Favaro, 2002).	63
Εικόνα 57 Χαρακτηριστική διαδικασία των σταδίων της τεχνολογίας προσθετικής επεξεργασίας. ..	66
Εικόνα 58 Ένας 3D Εκτυπωτής ρητίνης τεχνολογίας SLA (Πηγή).....	68
Εικόνα 59 Μια γραφική αναπαράσταση της βασικής λειτουργίας της στερεολιθογραφίας (SLA) στην τρισδιάστατη εκτύπωση.	69
Εικόνα 60 Διαδικασία 3D εκτύπωσης με επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ SLS (πηγή)	71
Εικόνα 61 3D Εκτυπωτής Τεχνολογίας SLS (πηγή).....	72
Εικόνα 62 Γραφική Αναπαράσταση της λειτουργίας ενός FDM εκτυπωτή. (πηγή)	74
Εικόνα 63 Μονομερή που αποτελούν το ABS πολυμερές. (πηγή)	75
Εικόνα 64 3D Εκτυπωτής τεχνολογίας FDM.	76
Εικόνα 65 Αναπαράσταση λειτουργίας ενός εκτυπωτή τριών διαστάσεων. (πηγή).....	77
Εικόνα 66 Εκτυπωτής τριών διαστάσεων, φωτογραφία από πρότυπο μηχάνημα του M.I.T. (πηγή).....	78
Εικόνα 67 Αναπαράσταση λειτουργίας 3D Εκτυπωτή τεχνολογίας L.O.M. (πηγή)	79
Εικόνα 68 3D Εκτυπωτής τεχνολογίας L.O.M. (πηγή).....	81
Εικόνα 69 Σχεδιάγραμμα στοιχείων ενός 3D Εκτυπωτή Τεχνολογίας SGC (πηγή).....	82
Εικόνα 70 3D Εκτυπωτής Τεχνολογίας SGC (πηγή).....	83
Εικόνα 71 Γραφική αναπαράσταση της διαδικασίας εκτύπωσης στην τεχνολογία MJM (πηγή).....	84
Εικόνα 72 3D Εκτυπωτής τεχνολογίας MJM (πηγή)	85
Εικόνα 73 Ο Σαρωτής EinScan Pro 2X HD της εταιρείας Shining 3D (πηγή)	86
Εικόνα 74 Τεχνικά χαρακτηριστικά του σαρωτή EinScan Pro 2X HD της εταιρείας Shining 3D (πηγή) .	87
Εικόνα 75 Παρουσίαση γυάλινου βάζου πριν και μετά την επικάλυψη του «AESUB Blue 3D Scan Spray». Αριστερά παρατηρούμε την υφή την επιφάνειας πριν την εφαρμογή και δεξιά μετά την εφαρμογή(πηγή) .	89
Εικόνα 76 Περιστροφικό τραπέζι “turn table” του σαρωτή EinScan Pro 2X HD. Στην εικόνα φαίνονται τα “Alignment Markers” (πηγή)	89
Εικόνα 77 Αναπαράσταση νέφους σημείων στο περιβάλλον του λογισμικού Shininig 3D.....	90
Εικόνα 78 Μεγέθυνση της εικόνας 77. Παρατηρούμε τα σημεία στο περιβάλλον του λογισμικού, το καθένα με τις δικές του ξεχωριστές συντεταγμένες. Τα σημεία που φαίνεται να εξέχουν από το γενικό μοντέλο αποτελούν θόρυβο.....	90
Εικόνα 79 Εργαλεία επιλογής “selection tools” του λογισμικού Shininig 3D.	90
Εικόνα 80 Διαδικασία χειροκίνητης ευθυγράμμισης με την βοήθεια τριών κοινών σημείων. (Scan in a box, 2015)	91
Εικόνα 81 Στην εικόνα παρατηρείτε το πρώτο αποτέλεσμα δημιουργίας τρισδιάστατου μοντέλου στο χώρο του λογισμικού Shininig 3D.	92
Εικόνα 82 Μοντέλο μετά την επεξεργασία “Smooth” παρατηρούμε πως συγκριτικά με την εικόνα 81, η επιφάνεια φαίνεται να είναι αρκετά πιο λεία.	93
Εικόνα 83 Το αγγείο χωρισμένο σε 2 κομμάτια, η διαχώριση γίνεται αντιληπτή με την χρωματική διαφοροποίηση. Στην φωτογραφία παρατηρούμε στοιγμοιστηπα από τις 4 πλευρές του μοντέλου στο περιβάλλον του λογισμικού 3D Builder.....	95
Εικόνα 84 Στην εικόνα παρατηρούμε την διαδικασία της συμπλήρωσης του δακτυλίου με την πορεία να αναπτύσσεται από αριστερά προς τα δεξιά με αποτέλεσμα ένα πλήρη δακτύλιο.....	95
Εικόνα 85 Στην εικόνα παρατηρούμε την διαδικασία της συμπλήρωσης του γεωμετρικού μοτίβου που παρατηρείται στο κάτω τμήμα το αγγείου που τονίζεται με κίτρινο χρώμα.	96
Εικόνα 86 Τελικό συμπληρωμένο γυάλινο αγγείο.	97

Εικόνα 87 Αναπαράσταση της διαδικασίας δημιουργίας του συμπληρωματικού κομματιού.	98
Εικόνα 88 Τελική παρουσίαση (Rendering) του σαρωμένου πρωτοτύπου αρχείου σε γκρι χρώμα μαζί με το κομμάτι συμπλήρωσης που δημιουργήθηκε σε κίτρινο χρώμα.....	99
Εικόνα 89 Περιβάλλον λογισμικού Ultimaker Cura έκδοση 5.0.0.....	100
Εικόνα 90 Στιγμιότυπο από το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού Cura. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται το μοντέλο προς εκτύπωση και με μπλε οι κολόνες στήριξης που τοποθετήθηκαν στο σημείο που είχε κλήση μεγαλύτερη από 60 μοίρες.....	102
Εικόνα 91 Παρουσίαση της επιλογής “Raft” (Δεν τοποθετήθηκε στην τελική παραμετροποίηση της εκτύπωσης).	103
Εικόνα 92 Προσομοίωση κομματιού συμπλήρωσης. Χρόνος εκτύπωσης: 1 ώρα και 44 λεπτά. Βάρος: 6 γραμμάρια.	103
Εικόνα 93 Προσομοίωση Συμπληρωμένου αγγείου. Χρόνος Εκτύπωσης: 6 ώρες και 11 λεπτά. Βάρος: 36 γραμμάρια.	104
Εικόνα 94 Προσομοίωση πρωτοτύπου σπασμένου αγγείου. Χρόνος Εκτύπωσης: 3 ώρες και 2 λεπτά. Βάρος: 15 γραμμάρια.	104
Εικόνα 95 Κομμάτι συμπλήρωσης του αγγείου	104
Εικόνα 96 Ακριβές αντίγραφο του μπασμένου γυάλινου κυπέλου.	105
Εικόνα 97 Αντίγραφο του γυάλινου κυπέλου μαζί με το κομμάτι συμπλήρωσης στα αριστερά. Το σπασμένο αντίγραφο του γυάλινου κυπέλου μαζί με την αναπαράσταση του συμπληρωμένου κυπέλου στα δεξιά.....	105

Θεωρητικό υπόβαθρο.

1. Συντήρηση και Συμπλήρωση Αντικειμένων Πολιτισμικής Κληρονομιάς.

Οι προσπάθειες διατήρησης επικεντρώνονται στην επιβράδυνση της φθοράς και τη διατήρηση της υπάρχουσας κατάστασης των αρχαιολογικών ευρημάτων όπως και στην προστασία της φυσικής κληρονομιάς ενός πολιτισμού. Τα ευρήματα συντηρούνται με σεβασμό για την αυθεντικότητά τους χωρίς να έχει σημασία αν πρόκειται για πολύ σημαντικά κομμάτια ή απλά καθημερινά αντικείμενα.

Η διαδικασία της συντήρησης κάνει για πρώτη φορά την εμφάνιση της ήδη από την νεολιθική εποχή. Η πρώιμη χρήση της ήταν κυρίως για αγγεία. Ο συντηρητής λαμβάνει υπόψη τα υλικά και τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τη σύνδεση των κελυφών, χωρίς να ανησυχεί για το αισθητικό αποτέλεσμα. Οι μέθοδοι επισκευής βασίστηκαν στην πρακτικότητα ενώ ταυτόχρονα εστιάζουν στην επαναχρησιμοποίηση του αντικειμένου και την σωστή λειτουργία του. Η εμφάνιση μεγάλων ιδιωτικών συλλογών κατά την περίοδο της Αναγέννησης και του Μπαρόκ πυροδότησαν το ξεκίνημα της ιστορίας της συντήρησης. Ο κανόνας που ισχύει είναι ότι το παλιό έργο προσαρμόζεται στα αισθητικά κριτήρια του εκάστοτε καλλιτέχνη, τεχνίτη ή συντηρητή που καλείται να προσφέρει μια κατανοητή, ολοκληρωμένη αναπαράσταση. Αυτός ο τύπος «αποκατάστασης» προτείνεται σε περιπτώσεις που λείπουν μέρη του αντικειμένου, και στόχος είναι η επαναφορά του αντικειμένου στην αρχική του κατάσταση. Ο συντηρητής θα κάνει όσο το δυνατόν λιγότερα για να πετύχει αυτόν τον στόχο. Μερικά από τα αντικείμενα επισκευάστηκαν περισσότερο από όσο χρειαζόταν δεδομένης της αρχικής τους κατάστασης. Τα αρχικά μέρη του αγγείου χρησιμοποιήθηκαν ως αφετηρία για μια πολύπλοκη διαδικασία προσθηκών και κακών συμπληρωμάτων, με αποτέλεσμα ένα νέο πλαστό αντικείμενο.

Το επάγγελμα του συντηρητή πρωτοεμφανίζεται κατά τον 18ο αιώνα στην Αμερική (Thornton, 1998). Αυτό το επάγγελμα αποτελεί πλέον μια ειδικότητα και όχι απλώς μια επεμβατική διαδικασία επισκευής. Αυτό το πεδίο μελέτης δημιουργήθηκε σε μεγάλο βαθμό λόγω των πολλών αρχαιολογικών ανακαλύψεων που έγιναν από τα μέσα του 18ου έως και την διάρκεια του 20ου αι. όπως και των εμπορικών συναλλαγών που αφορούσαν την πώληση και κατοχή αρχαίων κειμηλίων από μουσεία του ιδιωτικού τομέα. (Garachon, 2010).

Το γεγονός πως στην πρώιμη κεραμική δεν υπάρχουν φωτογραφίες είτε αναφορές των σταδίων της εργασίας, θέτει δύσκολη την απόκτηση πληροφοριών και στοιχείων για τις τότε εργασίες συντήρησης. Το επίκεντρο της συντήρησης ήταν σε μεγάλο βαθμό η αντιγραφή της εμφάνισης των αντικειμένων, χωρίς ιδιαίτερη προσοχή στην επιστήμη πίσω από αυτό. Τον 19ο αιώνα, οι προσπάθειες διατήρησης άρχισαν να γίνονται πιο συστηματικές, με μια θεωρητική βάση πίσω από αυτές. Αυτό οδήγησε στην ίδρυση των πρώτων διεθνών οργανισμών που ήταν αφοσιωμένοι στο να προστατέψουν την πολιτιστική κληρονομιά. Κάθε εργασία συντήρησης πρέπει να συμμορφώνεται πλέον με τα διεθνή πρότυπα δεοντολογίας, όπως ορίζονται σε διάφορους Χάρτες και Συμβάσεις και όπως τροποποιούνται μέσω επακόλουθων συνεδρίων και συναντήσεων. (Feilden, 1979) (Barassi, 2009).

1.1. Πρότυπο διαδικασίας της συντήρησης.

Υπάρχουν τέσσερις βασικές αρχές που διέπουν τις εργασίες συντήρησης: ελάχιστη παρέμβαση (Feilden, 1979), συμβατότητα, αναστρεψιμότητα και ασυμφωνία (Appelbaum, Butterworth – Heinemann U.K. - U.S.A.). Όπως αναφέρει ο ιστορικός και θεωρητικός διατήρησης έργων τέχνης του 20ου αιώνα, Cesare Brandi (Barassi, 2009), ο αναστηλωτής δεν πρέπει να προσπαθεί να αντικαταστήσει τον καλλιτέχνη ή να μιμηθεί το στυλ του, ούτε βέβαια να ερμηνεύσει υποκειμενικά το έργο, ιδίως όταν υπάρχει ένα κενό που πρέπει να καλυφθεί. Είναι σημαντικό να μην γίνουν παρεμβάσεις που ίσως να συσκοτίσουν την αληθή ηλικία του αντικειμένου, μειώνοντας τα σημάδια της διέλευσης του στο χρόνο. Πρέπει να είναι εφικτή η αναστρεψιμότητα οποιασδήποτε εργασίας συντήρησης. Τέλος, προκειμένου να επιλεγεί η καλύτερη πορεία δράσης, πρέπει να ληφθεί απόφαση με βάση τις συνθήκες και τις ανάγκες διατήρησης του αντικειμένου (Barassi, 2009).

Λαμβάνοντας υπ' όψη τα προαναφερθείσες αρχές διατήρησης, τα υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο, τις ιδιότητες των υλικών αυτών αλλά και την υφιστάμενη κατάσταση του κειμήλιου όπου θα συμπληρωθεί, η επιλογή ενός καινούργιου υλικού για το κομμάτι συμπλήρωσης πρέπει να χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες αρχές:

1. Ευκολία στην αφαίρεση.

Το υλικό πλήρωσης που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι αναστρέψιμο, ώστε τυχόν σφάλματα στην εφαρμογή του να διορθώνονται εύκολα χωρίς να καταστραφεί το αντικείμενο. Αυτό συνεπάγεται με το ότι ο συντηρητής έχει γνώση των υλικών και των μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αφαίρεση του εφαρμοζόμενου υλικού (Λαμπρόπουλος, 1993).

2. Ευχρηστία.

Η μέθοδος κατασκευής του υλικού θα πρέπει να είναι εύκολη στην εφαρμογή και αποτελεσματική με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές διαφορετικές ρυθμίσεις. Ο συντηρητής πρέπει να μπορεί να διαμορφώσει το υλικό για ποικίλες εφαρμογές, πάντα σε συνάρτηση με τον τύπο του κεραμικού αλλά και το σημείο το οποίο θα συμπληρωθεί. Υπάρχει η δυνατότητα να ελεγχθεί η πλαστικότητα του υλικού, κάτι που θα διευκόλυνε την εργασία. (Λαμπρόπουλος, 1993)

3. Συντελεστής θερμικής διαστολής και συμβατότητα.

Το κεραμικό υλικό πρέπει να είναι συμβατό με το υλικό πλήρωσης για να δημιουργηθεί ένας ισχυρός και ανθεκτικός δεσμός. Όταν δύο ουσίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με τρόπο που προκαλείται φθορά σε μια από τις 2 ή και στις 2, αυτό είναι γνωστό ως χημική ή μηχανική αντίδραση. Ο τρόπος που συμπεριφέρεται το συμπληρωματικό υλικό πρέπει να είναι στενά ευθυγραμμισμένος με το υλικό του κεραμικού και τις διακυμάνσεις που παρατηρούνται στη θερμοκρασία του. Συμπερασματικά, ο συντελεστής της θερμικής παραμόρφωσης του υλικού πλήρωσης θα πρέπει να είναι παρόμοιος με αυτόν του κεραμικού. Σε αντίθετη περίπτωση μπορεί να παρατηρηθούν ρωγμές ή σπασίματα σε μια επιφάνεια. Είναι σημαντικό το υλικό πλήρωσης που χρησιμοποιείται για επισκευές κεραμικών να είναι συμβατό όχι μόνο με το ίδιο το κεραμικό, αλλά και με τα διαφορετικά υλικά που έχουν τοποθετηθεί ή θα τοποθετηθούν για μελλοντικές προσπάθειες συντήρησης. (Λαμπρόπουλος, 1993)

4. Ανθεκτικότητα.

Το υλικό συμπλήρωσης δεν γίνεται να είναι πιο ανθεκτικό από το πρωτότυπο υλικό του κεραμικού. Παρόλο αυτά, το υλικό πρέπει να είναι ανθεκτικό ώστε να μην επιδέχεται φθορές από εξωτερικές συνθήκες όπως η αλλαγή της θερμοκρασίας, της υγρασίας, του φωτός κ.λπ. (Λαμπρόπουλος, 1993)

5. Περίοδος γήρανσης.

Ένας σημαντικός παράγοντας σε ένα συμπληρωματικό υλικό αποτελεί η μακροχρόνια περίοδος γήρανσης αλλά και οι μεταβολές που παρουσιάζει κατά τη γήρανση. Επιπλέον επιθυμητά χαρακτηριστικά για το υλικό όπου χρησιμοποιείται στη διαδικασία πλήρωσης αποτελεί ο γρήγορος χρόνος σταθεροποίησης και η ευκολία της επεξεργασίας αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της εφαρμογής. Παρόλο αυτά, η κόλλα δεν πρέπει να προσκολλείται ικανοποιητικά στο αρχικό κεραμικό αντικείμενο αποφεύγοντας φαινόμενα διαστολής ή συστολής έπειτα από την εναπόθεση της, ώστε να μην επηρεάζει τα παρακείμενα κομμάτια του αντικειμένου. Εν τέλει, το υλικό θα πρέπει να χαρακτηρίζεται ως οικονομικό μη τοξικό γενικά ασφαλές, (Λαμπρόπουλος, 1993).

6. Αποκατάσταση της αισθητικής.

Το τελικό στάδιο της δημιουργίας ενός κεραμικού αντικειμένου είναι το στάδιο της αισθητικής αποκατάστασης. Ακολουθείται η αισθητική διαδικασία προκειμένου να διασφαλιστεί ότι το αντικείμενο ξεχωρίζει στην όψη του θεατή με εμφανή τρόπο, χωρίς όμως να αποσπάται η προσοχή και να παρεμποδιστεί η αντίληψη του έργου στο σύνολό του. Οι επεμβάσεις αισθητικής αποκατάστασης δεν πρέπει να εισάγουν ξένα στοιχεία ή να προσπαθούν να ωραιοποιήσουν το θέμα, καθώς αυτό μπορεί να αποπροσανατολίσει και να παραπλανήσει τους θεατές. Οι μέθοδοι αποκατάστασης της αισθητικής πραγματοποιούνται μόνο στα μέρη συμπλήρωσης και ποτέ στη επιφάνεια του αντικειμένου. Αυτό οφείλεται στο ότι η εστίαση αυτών των τεχνικών είναι στην εμφάνιση του αντικειμένου και όχι στη λειτουργία του. Ως εκ τούτου, μπορούν να επιλέξουν οποιαδήποτε συμβατά υλικά και τεχνικές πλήρωσης για να δημιουργήσουν ένα αισθητικό αποτέλεσμα που είναι σχετικό με το κεραμικό. Το αποκατεστημένο κομμάτι θα πρέπει να διακρίνεται από το πρωτότυπο, ενώ παράλληλα συμπληρώνει την αισθητική του αντικειμένου στο σύνολό του. Οι εργασίες αποκατάστασης της αισθητικής δεν γίνεται να υπερβαίνουν την καλλιτεχνική υπόσταση ίδιου του αντικειμένου. Είναι επιθυμητό τα υλικά να είναι αναστρέψιμα, ώστε να μπορούν να πραγματοποιηθούν διορθώσεις ή μελλοντική συντήρηση χωρίς να καταστραφεί το ολοκληρωμένο τμήμα. (Λαμπρόπουλος, 1993)

7. Τεκμηρίωση.

Είναι απαραίτητο να τεκμηριώνονται οι εργασίες συμπλήρωσης με λεπτομερή απογραφή των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν και των τεχνικών που ακολουθούνται (Λαμπρόπουλος, 1993).

1.2. Τεχνικές και Υλικά συμπλήρωσης – συγκόλλησης από τα αρχαία χρόνια ως και τώρα.

Η χειροποίητη κεραμική έχει βρεθεί στους αρχαιότερους αρχαιολογικούς χώρους της νεολιθικής εποχής. Υπάρχουν ενδείξεις ότι οι άνθρωποι ασχολούνται με τη συντήρηση κεραμικών αντικειμένων εδώ και χιλιάδες χρόνια, κυρίως για αισθητικούς ή λειτουργικούς λόγους. Υπάρχουν πολλές περιπτώσεις δοχείων που παρουσιάζουν στοιχεία συντήρησης από την Προϊστορία έως τον Μεσαίωνα και ύστερα. Αυτά αποτελούν σπουδαία στοιχεία της ιστορίας της διατήρησης (Boardman, 2006). Υπάρχουν μόνο ελάχιστες τεκμηριωμένες περιπτώσεις αρχαίων πολιτισμών που παρεμβαίνουν στα αντικείμενα κεραμικών μέχρι τον 18ο αι. Οι σημαντικότερες αναφορές για τις πρωτογενείς τεχνικές και μεθόδους που χρησιμοποιούνται στην αρχαιολογία αποτελούν οι αντίστοιχες βιβλιογραφικές αναφορές και τα αρχαιολογικά ευρήματα από όλο τον κόσμο.

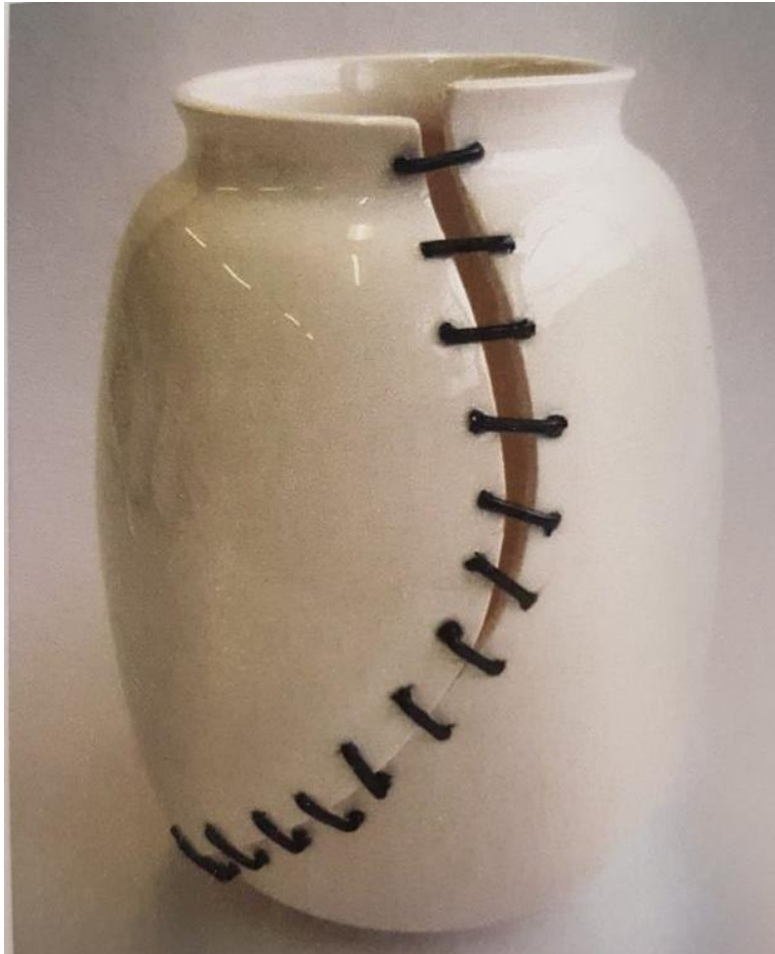
Στη συνέχεια παρέχεται μια επισκόπηση των προσπαθειών συντήρησης κατά τη διαδικασία συγκόλλησης, συμπεριλαμβανομένων των τύπων υλικών και τεχνικών που χρησιμοποιούνται σε όλη την ιστορία.

Τα πρώτα παραδείγματα επεμβάσεων έχουν βρεθεί στη περιοχή της Νότιο-ανατολικής Τουρκίας, της Βόρειας Συρίας και του Βόρειου Ιράκ. Οι προσπάθειες συμπλήρωσης αυτές τοποθετούνται περίπου στο 7000 έως 6900 π.Χ. Η χρήση θεματικού υλικού εντοπίζεται σε υλικά με βάση τον ασβέστη ή γύψο που εφαρμόζονται σε κεραμικά αντικείμενα για να καλύψουν ρωγμές και να γεμίσουν κενά. Οι τεχνικές και τα υλικά που χρησιμοποιούσαν οι αρχαίοι εργάτες συντήρησης έχουν βρεθεί ότι έχουν πρακτικές εφαρμογές στη σύγχρονη ζωή. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι χρησιμοποιούνταν στην κατασκευή σπιτιών (Dooijes, 2008).



Εικόνα 1 Παραδείγματα της παλαιότερης κεραμικής στην Άνω Μεσοποταμία στην περιοχή Tell Sabi Abyad περίοδος 7000-6700 π.Χ. (Τα κεραμικά αγγεία εκθέτονται αυτή την στιγμή στο Εθνικό Μουσείο Αρχαιοτήτων στο Leiden στα επίπεδα A16-A11)

Η πιο κοινή μέθοδος για την συμπλήρωση κεραμικών αγγείων κατά την διάρκεια της προϊστορίας αποτελεί το άνοιγμα οπών κατά μήκος και παράλληλα των ρωγμών γειτονικών θραυσμάτων που εμφανίστηκε για πρώτη φορά κατά τη νεολιθική περίοδο μεταξύ 8000-5000 π.Χ. Οι τρύπες πραγματοποιούνταν χρησιμοποιώντας ένα αιχμηρό εργαλείο από υλικό όπως πυριτόλιθο ή οψιανό. Το αντικείμενο δενόταν με ένα δερμάτινο σχοινί ή κορδόνι που περνούσε μέσα από τρύπες στα θραύσματα. Μερικές φορές είναι δυνατό να δούμε ίχνη σκουρόχρωμης πίσσας (πίσσας) σε αντικείμενα που έχουν επισκευαστεί με αυτήν. Το υλικό αυτό βρίσκεται σε διάφορα μέρη της Εγγύς Ανατολής, ενώ έρευνες δείχνουν ότι το εμπόριο του γινόταν σε μεγάλες αποστάσεις κατά τη νεολιθική περίοδο. (Connan, 2004)



Εικόνα 2 Μεταγενέστερο δοχείο που ακολουθεί την προϊστορική μέθοδο επισκευής σύνδεσης με σύρμα ως τέχνη. [\(πηγή\)](#)

Σε πολλές περιπτώσεις, οι δύο παραπάνω μέθοδοι συντήρησης συνδυάστηκαν, καθιστώντας το αγγείο εξαιρετικά αδιάβροχο, ιδιαίτερα όταν τα θραυσμένα κομμάτια ήταν πρόσφατα. Οι τεχνικές που περιγράφονται παραπάνω έχουν χρησιμοποιηθεί για τη συντήρηση πέτρινων σκευών. Έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμες εκσκαφές στη περιοχή Tell Sabi Abyad της βόρειας Συρίας, αποκαλύπτοντας ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα από αυτά τα ευρήματα και στοιχεία για τις τεχνικές συντήρησης της εποχής (Dooijes, 2008).



Εικόνα 3 Σχηματική αναπαράσταση της πρώτης μεθόδου σύνδεσης θραυσμάτων με τρύπες, που συνδέονται με δερμάτινο σχοινί ή κορδόνι. (Dooijes R., 2007)

Έχει παρατηρηθεί ότι, στα μεταγενέστερα χρόνια της Χαλκολιθικής περιόδου, η μέθοδος επισκευής των κεραμικών αγγείων παρέμεινε αμετάβλητη, με τα οργανικά υλικά να αντικαθίστανται από μεταλλικά σύρματα, κυρίως μπρούτζο και μόλυβδο. (Dooijes R., 2007)



Εικόνα 4 Σχηματική αναπαράσταση τεχνικής στην οποία χρησιμοποιείται μεταλλικό σύρμα αντί για οργανικά υλικά.

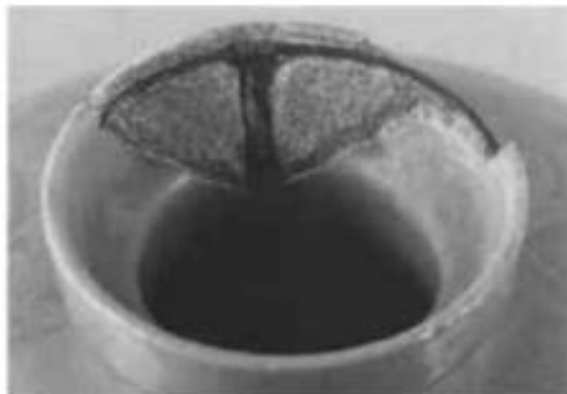
Μία άλλη τεχνική συγκόλλησης των κομματιών ήταν η εναπόθεση συνδετικών μόλυβου με σχήμα Π στο μήκος της σύνδεσης. Αυτοί οι σύνδεσμοι δεν διείσδυσαν πλήρως στα θραύσματα. Υπάρχει μεγάλη πιθανότητα οι σύνδεσμοι να σφυρολατήθηκαν στις ενώσεις. (Dooijes R., 2007)



Εικόνα 5 Σχηματική αναπαράσταση τεχνικής στην οποία τοποθετούνται σύνδεσμοι μόλυβου σε σχήμα Π (Dooijes R., 2007).

Αν και το μέταλλο χρησιμοποιείται συχνά για συνδέσμους, το γέμισμα με την βοήθεια μετάλλων είναι μια κοινή πρακτική. Η προσθήκη μεταλλικού οπλισμού, με τη μορφή μεταλλικού πλέγματος ή υλικού πλήρωσης, ενισχύει τη δομή. Σε αυτή την περίπτωση, κατασκευάζεται ένα ιδικό πλέγμα από σύρμα, πλάκα χαλκού ή μπρούτζο, το οποίο προσαρμόζεται στο μέρος της απώλειας και στερεώνεται με οπές στην εσωτερική πλευρά των άκρων κοντινών τεμαχίων με κασσίτερο. Ο κασσίτερος χρησιμοποιήθηκε ως υλικό προστασίας επικαλύπτοντας την επιφάνεια του χαλκού, προκειμένου να αποφευχθεί η οξείδωση. Τοποθετήθηκε ο μεταλλικός οπλισμός και στη συνέχεια καλύφθηκαν τα σημεία με υλικά πλήρωσης για να δημιουργηθεί μια απομίμηση κεραμικού υλικού. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα γλυπτά ήταν κατασκευασμένα από πηλό και άλλα συνθετικά υλικά (εικόνα 6). Ο ακατέργαστος πηλός χρησιμοποιείται πολλές φορές, από τα αρχαία χρόνια έως και τον 20ο αι., στην συμπλήρωση κεραμικών. Αυτό γίνεται επί τω πλείστον για την κάλυψη επισκευών και ατελειών. Ο πηλός όταν είναι ακόμα άψητος δεν χαρακτηρίζεται από ευστάθεια, ειδικά όταν εκτίθεται σε υψηλότερα επίπεδα υγρασίας. Οι κόλλες ζωικής προέλευσης και η γομαλάκα

χρησιμοποιήθηκαν συνήθως ως πρόσθετα τον 19ο αιώνα, καθώς επέτρεπαν τη διαμόρφωση της μάζας αργίλου, δίνοντάς της σημαντικές ιδιότητες αντοχής και σκληρότητας μετά την ξήρανση. Ο μεταλλικός σκελετός ήταν απαραίτητος για τη στήριξη του πήλινου σώματος κατά την εφαρμογή των γεμισμάτων (εικ. 6) (Koob, 1998).



Εικόνα 6 Αγγείο με μεταλλικό σκελετό με σκοπό την στήριξη του Πηλού συμπλήρωσης (Koob, 1998).

Σε ορισμένες περιπτώσεις, μια μερική απώλεια ενός κεραμικού αντικειμένου, όπως μια λαβή, συμπληρώνεται πλήρως ή αντικαθίσταται από ένα διαφορετικό είδος υλικού, όπως μέταλλο ή ξύλο. Ξύλινα μανταλάκια και καρφίτσες χρησιμοποιήθηκαν για την προσάρτηση θραυσμάτων στο κεραμικό σώμα (Lanmon, 1969). Το πριονίδι αναμειγνύονταν με ζωικές κόλλες ή άλλες ρητίνες για να δημιουργηθούν γεμίσματα για μεγάλους και μικρούς χώρους (Buys, 1996). Κλείνοντας, περιγράφεται μία μέθοδος στην οποία έγιναν προσθήκες με κομμάτια ξύλου που έχουν κολληθεί μεταξύ τους με κάποιο υλικό συγκόλλησης και στη συνέχεια καλύφθηκαν. (Koob, 1998)

Ενώ οι μεταλλικοί σκελετοί και τα μεταλλικά στοιχεία δεν χρησιμοποιούνται παραδοσιακά ως υλικά πλήρωσης για αγγεία, μπορεί να προκαλέσουν φθορά στις αρχικές επιφάνειες της κεραμικής εάν δεν χρησιμοποιηθούν σωστά. (Koob, 1998)

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, η Χαλκολιθική περίοδος είδε τη χρήση της πίσσας ως συγκολλητικό και συμπληρωματικό υλικό, το οποίο έλιωνε και χυνόταν ή βουρτσίζονταν πάνω στο αντικείμενο. Αυτή η πρακτική συνεχίστηκε ως στα τέλη του 19ου αιώνα. Ο όρος «πίσσα» αναφέρεται σε ένα μείγμα φυσικών ορυκτών υλικών, υδρογονανθράκων άγνωστης σύστασης ή προϊόντων διύλισης, ενώσεων άνθρακα και αργού πετρελαίου. Η σύνθεση αυτού του υλικού μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τη συγκέντρωση των ελαίων ή της ρητίνης από πεύκο ή άλλα δέντρα. Αυτό το υλικό, γυαλίζει στην όψη κολλάει στην υφή, το χρώμα του παρατηρείται από σκούρο καφετί ως και μαύρο, είναι ένα βασικό υλικό με δύο χρήσεις, δηλαδή έχει χρησιμοποιηθεί ως κόλλα αλλά και ως πληρωτικό υλικό. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως με το πέρασμα των χρόνων αυξάνεται σημαντικά η ευθραυστότητα του και απαιτούνται διαλύτες-πετρελαίου η διαλύτες που εμπεριέχουν αλκοόλ (Koob, 1998). Αυτή η τεχνική εμφανίζεται σε πολλά παραδείγματα λειτουργιών. Το δοχείο της συλλογής Jebel Aruda από την περιοχή του Leiden στην Ολλανδία είναι σημαντικό γιατί καλύπτεται σημαντική ποσότητα αυτού του υλικού, αρκετά στο χέλος αλλά και στο κύριο μέρος του (Doonjes, 2007). Αρκετά αγγεία με τον ίδιο τύπο εφαρμογής έχουν ανακαλυφθεί στο Νότιο και Νοτιοδυτικό τμήμα της Αμερικής, καθώς και στη Αγγλία. (Koob, 1998)



Εικόνα 7 Δοχείο της περιοχής jebel Arruda (3^η χιλιετία π.Χ.), μέγεθος 90 εκατοστά. (Dooijes, 2007)

Οι κόλλες και τα υλικά πλήρωσης όπως οι ζωικές κόλλες άρχισαν να εμφανίζονται τον 18ο αιώνα και έγιναν όλο και πιο δημοφιλή στις αρχές του 20ού αιώνα. Οι ζωικές κόλλες κατασκευάζονται από πρωτεΐνες που εξάγονται από ζώα. Αυτές οι πηγές παρουσιάζουν περίσσια κολλαγόνου, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για χρήση σε ποικίλες εφαρμογές. Οι κόλλες παρασκευάστηκαν με διάσπαση του αρχικού κολλαγόνου σε μικρότερες πολυμερείς αλυσίδες. Έτσι, με το βράσιμο των παραπάνω ουσιών, παράγεται ένα απόθεμα το οποίο στη συνέχεια συμπυκνώνεται και ξηραίνεται με αποτέλεσμα να σχηματιστεί μια πάστα. Οι ζωικές κόλλες έχουν χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία καινούργιων κολλητικών και συμπληρωτικών. Το αντικείμενο παρουσιάζει χρώμα που κυμαινόταν από καφέ έως κίτρινο και έγινε πιο σκούρο με την πάροδο του χρόνου. Συνήθως, το αναμείγνυαν με διαφορετικά υλικά για να αυξήσουν τη σκληρότητα και να μειώσουν τη συρρίκνωση που παρουσίαζε. Μόλις δέσουν οι κόλλες, γίνονται αρκετά σκληρές, αλλά μπορούν να υποστούν επεξεργασία.

Σύμφωνα με μελέτη στο πανεπιστήμιο του Cambridge, κόλλες αναμειγμένες με κιμωλία, πλακάκια ή άλλα υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να γεμίσουν μικρά κενά (Rathgen, 1905). Η προσθήκη γλυκερίνης σε κόλλες ζωικής προέλευσης ήταν αρκετά σύνηθες φαινόμενο και συνήθως απέδιδε ένα μείγμα βελτιωμένης σκληρότητας και ελαστικότητας κατά τη διαδικασία σκλήρυνσης. Κατά την προσθήκη γλυκερίνης σε ορισμένη ποσότητα, μπορεί να παραχθεί ένα είδος ουσίας που μοιάζει με καουτσούκ. Η χρήση ενός μείγματος ζωικής κόλλας, ανθρακικού ασβεστίου, οξειδίου ψευδαργύρου, λευκού μολύβδου και αργίλου ως πληρωτικού υλικού ήταν αρκετά συνηθισμένη. Το ανθρακικό ασβέστιο χρησιμοποιήθηκε ευρέως στην αρχαία Αιγύπτω, ως υλικό πλήρωσης όπως και ως υλικό προετοιμασίας της επιχρύσωσης. Όταν τα γεμίσματα κατασκευάζονταν από ένα μείγμα πηλού και κόλλας, το προϊόν παρομοίαζε το αρχικό υλικό του αντικείμενου και είναι σχεδόν μη αντιληπτό σήμερα, ακόμα και κάτω από το φως υπέρυθρης ακτινοβολίας (Koob, 1998). Αυτές οι κόλλες προετοιμάζονται εύκολα και έχουν χαμηλό κόστος. Μπορούν να στερεοποιηθούν σε

κατάσταση της μορφής τζελ ακόμα και σε θερμοκρασίες εσωτερικού χώρου και η ανάμιξη τους με άλλα υλικά γίνεται ομοιόμορφα χωρίς να παρατηρείται διαχώριση. Ωστόσο, σύμφωνα με τη μελέτη, τα υλικά παρουσίασαν συρρίκνωση και δεν ήταν πολύ σταθερά σε σχέση με τις αλλαγές στην υγρασία (Thornton, 1991).



Εικόνα 8 Συμπλήρωση με ζωική κόλλα. (Koob, 1998)

Η προσθήκη λινελαίου και τερεβινθίνης σε ζωικές κόλλες βρέθηκε ότι αυξάνει την αντοχή και τον χρόνο επεξεργασίας. Αυτές οι κόλλες έχουν διακοπεί λόγω συρρίκνωσης, ευθραυστότητας, ευαισθησίας στην υγρασία και χρωματικών αλλαγών στις επιφάνειες των κεραμικών (Rathgen, 1905).

Τον 18ο αιώνα, ένα μείγμα ασβέστη και ασπράδι αυγού αναφέρθηκε ως συμπληρωματικό υλικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση άλλων υλικών μεταξύ τους, δημιουργώντας μείγματα διαφορετικής σύνθεσης. Οργανικά υλικά όπως κόλλες ζωικής προέλευσης, εκχύλισμα από σκόρδο, τυροκομικά, γαλακτοκομικά, στοματικά υγρά και αίμα από σαλιγκάρι μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συγκολλητικά, συχνά σε συνδυασμό με οξείδιο του ασβεστίου. Η παρουσία αυτών των υλικών στα αρχαιολογικά ευρήματα είναι αρκετά δύσκολο να προσδιοριστεί. (Garachon, 2010)

Σύμφωνα με τον Koob, ένα ρητινώδες βερνίκι γνωστό ως ugushi έχει χρησιμοποιηθεί παραδοσιακά στην κεραμική αποκατάσταση. Εμφανίστηκε γύρω στο 2500 π.Χ. Το ασιατικό δέντρο *Rhus vernicifera* χρησιμοποιήθηκε κυρίως για τη ρητίνη του στην Ιαπωνία μέχρι τον 20ο αιώνα. Αυτή η ρητίνη έχει ένα ανοιχτό καθαρό κίτρινο-καφέ χρώμα και έχει την δυνατότητα να αναμιχθεί με διαφορετικές ουσίες ώστε να δημιουργήσει ένα νέο υλικό. Παρατηρείται απαίτηση υψηλής θερμοκρασίας και αρκετού χρόνου για την σταθεροποίηση του. Χαρακτηρίζεται ως ένα μη αντιστρέψιμο υλικό, ιδιαίτερα τοξικό, αλλά σταθεροποιείται όταν επιμεταλλωθεί με μεταλλικό χρυσό, επειδή προστατεύεται από την οξείδωση και την υπεριώδη ακτινοβολία. Η ανακάλυψη καινούριων συνθετικών ρητινών οδήγησε σε μείωση της χρήσης ugushi στην πλήρωση κεραμικών υλικών. (Koob, 1998)

Η χρήση θραυσμάτων από άλλα αγγεία για την αντικατάσταση χαμένων τμημάτων είναι μια τεχνική με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις αρχαίες εργασίες διατήρησης. Η συμπλήρωση με κομμάτια που ανήκουν σε διαφορετικό αγγείο παρατηρείται από τις αρχές του 6^{ου} μέχρι τον 20^ο αιώνα π.Χ.. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί θραύσματα ή ολόκληρα κομμάτια αγγείων για να αντικαταστήσει ή να συμπληρώσει θραύσματα κελύφους άλλων αγγείων. Το εξωτερικό περίβλημα τοποθετείται μέσα ή πάνω από το διάκενο. Σύμφωνα με αρχαία αρχεία, αυτά τα πρόσθετα κομμάτια αγγείων ήταν

προσαρτημένα σε μεταλλικούς συνδέσμους με μηχανικό τρόπο. Πιο πρόσφατες εφαρμογές έχουν προσπαθήσει να συνδυάσουν παρόμοια ξένα όστρακα τόσο από το χρώμα όσο και από τη διακόσμηση (Κοοβ, 1998). Σε ορισμένα παραδείγματα, το νέο κέλυφος δρα ως υλικό πλήρωσης, ενώ σε άλλες χρησιμοποιείται ως βάση η οποία στη συνέχεια καλύπτεται με άλλο υλικό ή χρώμα. Τα ξένα κομμάτια αλλά και τα κομμάτια από χαμένο μέρος του αντικειμένου χρειάστηκε να μετατραπούν όπως ήταν απαραίτητο με επιφανειακή αφαίρεση. Η ζημιά που προκλήθηκε από αυτό ήταν τόσο σοβαρή που δεν μπορούσε να επισκευαστεί και θα χρειαζόταν πρόσθετα υλικά. Αυτή η μέθοδος έχει χρησιμοποιηθεί για την αντικατάσταση πολλών τμημάτων από αγγεία. (Κοοβ, 1998)



Εικόνα 9 Ελληνικό Αγγείο του οποίου μέρος έχει συμπληρωθεί από τμήμα αλλού παρόμοιου αγγείου. (Κοοβ, 1998)



Εικόνα 10 Ελληνικού αγγείου του οποίου το μεγαλύτερο τμήμα έχει καλυφθεί με κομμάτια από εντελώς διαφορετικά αγγεία, χρησιμοποιώντας το αρχικό μόνο ως βάση αναφοράς. (Κοοβ, 1998)

Έχει παρατηρηθεί ότι όχι μόνο αντικαθίστανται θραύσματα από το κύριο μέρος του αγγείου με άσχετα κομμάτια, αλλά και με πρόσφατα κατασκευασμένα τμήματα, όπως μέρος της βάσης, οι λαβές και το χείλος. Αυτή η αρχαία μέθοδος συμπλήρωσης μπορεί να βρεθεί σε πολλούς διαφορετικούς πολιτισμούς, συμπεριλαμβανομένης της αρχαίας Αιγύπτου, της Μέσης Ανατολής, της Κίνας και της Ευρώπης. Χρησιμοποιήθηκε μέχρι τον 18ο και 19ο αιώνα. Αυτή η τεχνική περιλάμβανε την διαλογή του σωστού πηλού, σε συνάρτηση πάντα με τον τύπο του αντικειμένου που έπρεπε να γεμίσει. Μετά την διαδικασία του καλουπώματος του πηλού στο επιθυμητό πάχος, γινόταν εφαρμογή στην περιοχή του σπασίματος, ακολουθώντας τη μορφή του αγγείου. Όταν ο πηλός στεγνώνει, συρρικνώνεται και αφαιρείται ευκολότερα από την περιοχή. Αφού άφηναν τον πηλό να στεγνώσει, τον έσπαγαν σε πιο

μικρά μέρη για να αποφύγουν περαιτέρω παραμόρφωση κατά την διαδικασία του ψησίματος ώστε να δημιουργηθεί μια πιο ομοιόμορφη εμφάνιση του τελικού προϊόντος. Αυτός ο τύπος αποκατάστασης είναι δύσκολο να διακριθεί από το αρχικό αγγείο με την πρώτη ματιά, αφού το τελικό προϊόν είναι συχνά αρκετά παρόμοιο με το αρχικό. Μια αναφορά από το 1837 καταδεικνύει ότι αυτή η τεχνική ήταν συνηθισμένη εκείνη την εποχή, όπως αποδεικνύεται από την ανακάλυψη ενός θραύσματος με υπογραφή και τη φράση «in Roma l'ann 1837» που αναγράφεται σε αυτό. Αυτή η υπογραφή υποδηλώνει προηγούμενη λειτουργία συντήρησης (Koob, 1998).



Εικόνα 11 Θραύσμα αγγείου με υπογεγραμμένη τη φράση «in Roma l'ann 1837» (Koob, 1998)



Εικόνα 12 Συμπληρωμένο αγγείο με κομμάτι φτιαγμένο από την αρχή με σκοπό τη μίμηση του αρχικού μοτίβου. (Arthur M. Sackler Gallery, S 1987.85) (Koob, 1998)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται και σε εφυαλωμένα δοχεία, που τα νέα κομμάτια είναι πιστή αντιγραφή των μοτίβων και της υφής του αρχικού δοχείου (εικόνα 12). Αυτή η μέθοδος πλήρωσης απαιτεί υψηλό επίπεδο δεξιοτήτων και γνώσεων, καθώς και υπομονή, όταν το μοτίβο του αγγείου είναι περίπλοκο και με αρκετά χρώματα. Τα κατασκευασμένα θραύσματα ενώνονταν στο κεραμικό δοχείο με κόλλα. Αυτός ο τύπος αποκατάστασης ήταν εύκολο να εντοπιστεί επειδή το ανακατασκευασμένο στοιχείο παρουσίαζε πολλά σημάδια ατέλειας, όπως ότι ήταν κατασκευασμένο από διαφορετικό τύπο πηλού ή ανεπαρκώς υαλωμένο. Τα βερνίκια στα νέα θραύσματα επίσης

σπάνια ταίριαζαν με τα αρχικά υαλώματα όσον αφορά το χρώμα, τη σύνθεση ή τις φυσικές ιδιότητες. (Koob, 1998)

Ενδιαφέρον παρουσιάζει μια ακόμα μέθοδος συμπλήρωσης αγγείων με «ξένα» όστρακα ή με όστρακα πηλού φτιαγμένα από το μηδέν. Είναι η εκ νέου πυροδότηση του αγγείου μετά την επέμβαση για να τελειοποιηθούν οι αρμοί ώστε να μην διακρίνεται η γέμιση. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιήθηκαν υαλώματα χαμηλότερου σημείου τήξης για επισκευές. Το γυαλί εφαρμοζόταν στο κεραμικό σκεύος και στη συνέχεια ψήθηκε ξανά σε χαμηλότερη θερμοκρασία. Με αυτόν την μέθοδο, το γυαλί ρευστοποιούνταν και συνδυαζόταν με την επιφάνεια του κεραμικού ή το προγενέστερο γυαλί. Αυτή η διαδικασία ένωσε όλα τα κομμάτια, κάλυπτε τα σπασίματα και εξασφάλισε την ομοιογενή εμφάνιση. Η τεχνική είναι γνωστή ως «ψήσιμο πορσελάνης» ή «china burning» ή «fired restoration». Η τεχνική εμφανίστηκε επί τω πλείστων στα τέλη του 18ου αιώνα και μπορεί να παρατηρηθεί σε μια ποικιλία δειγμάτων κεραμικής του 18ου αιώνα από την Ελλάδα, τον ισλαμικό κόσμο και την Ευρώπη. Η εφαρμογή αυτής της διαδικασίας σε κεραμικά αντικείμενα ενέχει υψηλό κίνδυνο ζημιάς ή αλλοίωσης στο αρχικό αντικείμενο, συμπεριλαμβανομένης της διακόσμησης, του λούστρου και των χρωμάτων του. (Koob, 1998)

1.3. Υλικά που χρησιμοποιούνται στις διαδικασίες συμπλήρωσης από την αρχαιότητα έως σήμερα.

1. Φυτικά κεριά – *Natural Waxes*.

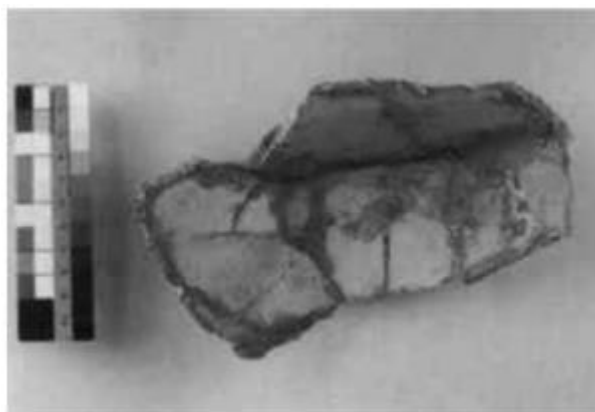
Τα φυτικά κεριά, για παράδειγμα το κερί μέλισσας, χρησιμοποιούνται πριν από την εποχή της ρωμαϊκής αυτοκρατορίας. Το κερί από μέλισσα συχνά αναμειγνύεται με κερί καρναούμπα (κερί που παράγεται από τα νεαρά φύλλα του φοίνικα *Copernicia Prunifera*, ενός φυτού που προέρχεται και καλλιεργείται μόνο στη βορειοανατολική Βραζιλία. Είναι υποκίτρινα σφαιρίδια με σημείο τήξης 82-86°C.) για να δημιουργηθεί ένα σκληρότερο, πιο ανθεκτικό υλικό πλήρωσης. Διαπιστώθηκε ότι ως υλικό προστέθηκε σε ελληνικά κεραμικά αγγεία κατά τη συντήρηση στα τέλη του 19ου αιώνα και στις αρχές του 20ού αιώνα. Τα κεριά αναμειγνύονταν με χρωστικές για να δημιουργηθεί μια επιφάνεια στο κεραμικό που ταίριαζε με το υάλωμα και την επιφάνεια του. Η προσθήκη ρητίνης *elemi* στο κερί βρέθηκε ότι βελτιώνει τις συγκολλητικές του ιδιότητες και δημιουργεί μια επιφάνεια που έμοιαζε πολύ με γυαλί. Ωστόσο, η χρήση αυτού του υλικού ήταν περιορισμένη λόγω της τάσης του να αποχρωματίζεται και να λερώνεται με την πάροδο του χρόνου. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν και συνιστώνται κεριά ως επικαλύψεις γεμισμάτων καθώς παρουσιάζουν υψηλή αντοχή και ικανότητά να μιμούνται υαλωμένη ή λουστραρισμένη επιφάνεια. Τα κεριά είναι δημοφιλή καθώς δίνουν ένα γυάλινο, διαφανές αποτέλεσμα. Ωστόσο, πιο σταθερά συνθετικά κεριά τα έχουν αντικαταστήσει με το πέρασμα του χρόνου (Koob, 1998).



Εικόνα 13 Βάζο με προέλευση την Συρία. Οι κολλήσεις έχουν γίνει με φυσικά κεριά και οι συμπληρώσεις με ανακατασκευασμένα κομμάτια όπου χρωματίστηκαν με χρώμα πράσινο. (Gallery of Art Freer, F 09.125) (Koob, 1998)

2. Γομαλάκα – Shellac.

Η Γομαλάκα έχει χρησιμοποιηθεί ως υλικό συγκόλλησης αλλά και σαν βερνίκι κάλυψης από τον 16ο έως τον 20ο αι. Η ρητίνη αυτή, εξάγεται από ένα έντομο που εντάσσεται στην οικογένεια των Αφίδων, διατίθεται σε διάφορες μορφές, με την πιο κοινή να ονομάζεται «νιφάδα πορτοκαλιού» (orangeflake). Η γομαλάκα διαλύεται σε ζεστό οινόπνευμα που την μετατρέπει σε υγρό όταν θερμαίνεται, έτσι έχει την δυνατότητα να δρα σαν βάση στην κατασκευή διαφορετικού μείγματος ή ουσίας χρωστικής. Αυτό το υλικό χρησιμοποιήθηκε ευρέως ως κόλλα επειδή είναι θερμοπλαστικό. Για αυτό τον λόγο γίνεται εύκολο για τον συντηρητή να επισκευάσει μια κακή ευθυγράμμιση των κελυφών κατά την θέρμανση των σημείων με μια λυχνία ή μια λάμπα Bunser (ένα κοινό σκεύος εξοπλισμού εργαστηρίου που προσφέρει μια αέρια φλόγα, που χρησιμοποιείται για αποστείρωση, θέρμανση και καύση.). Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα αυτού του υλικού είναι ότι αν υπερθερμανθεί, η ρητίνη θα καεί και θα προκαλέσει σημαντική φθορά του αντικειμένου. Είναι επιπλέον δύσκολο να αφαιρεθεί καθώς είναι εύθραυστο και δομικά ασταθές (Koob, 1984). Αυτές οι ιδιότητες καθιστούν δύσκολη την εργασία και την αφαίρεση του υλικού. Η Γομαλάκα φέρεται να χρησιμοποιήθηκε ως υλικό πλήρωσης. συνήθως αναμειγνύονταν με διάφορα υλικά όπως κόλλες ζωικής προέλευσης και μαστίχες (προέλευση υλικού, ρητίνη από πεύκο φιστικιού) (Εικόνα 14). Εκτός από τα προβλήματα ευθραυστότητας που αναφέρθηκαν παραπάνω, τα οποία έχουν ταλαιπωρήσει παλαιότερες αποκαταστάσεις κατά τον 19ο αι., η αστάθεια που παρουσιάζει φυσικά το υλικό οδηγεί συχνά στην κατσούφη του κελύφους του αγγείου. Αυτό οφείλεται συχνά σε διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας στο χορού που έχει αποθηκευτεί το αγγείο. (Koob, 1998)



Εικόνα 14 Γομαλάκα σε μορφή αλοιφής που χρησιμοποιείται ώστε να συμπληρωθούν κενά ανάμεσα σε κομμάτια αγγείου. (Κοοb, 1998)



Εικόνα 15 Αγγείο ελληνικής προέλευσης συμπληρωμένο με χρώματα που έχουν βάση τη γομαλάκα. (Κοοb, 1998)

3. Πυριτικό Νάτριο - *Sodium Silicate*

Το Πυριτικό Νάτριο ή αλλιώς ρευστό γυαλί, προτάθηκε με σκοπό να χρησιμοποιηθεί για υλικό επιδιόρθωσης κεραμικών από το ξεκίνημα 19ου έως τα μέσα του 20ού αιώνα. Ωστόσο, πηγές αναφέρουν ότι χρησιμοποιήθηκε κιάλας κατά το έτος 1640. Το υλικό φαίνεται βρέθηκε σε εργασίες του χημικού Paracelsus κατά την περίοδο 1490 έως και 1541, με την ονομασία «*destillatiocrystalli*». Κρυσταλλική Απόσταξη ονομάζεται μια διαδικασία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον καθαρισμό ενός υγρού αφαιρώντας ακαθαρσίες που είναι διαλυμένες σε αυτό. Αυτή η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή υγρών υψηλής καθαρότητας και χρησιμοποιείται συχνά στην παραγωγή φαρμακευτικών προϊόντων και άλλων προϊόντων όπου η καθαρότητα είναι σημαντική (Crookes, 1892) (Κοοb, 1998). Διατίθεται σε μορφή σκόνης ή διαλύματος και έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς ως συγκολλητικό υλικό (γνωστό ως ορυκτή κόλλα) και ως πληρωτικό σε μεγάλη γκάμα υποστρωμάτων που αναμειγνύεται με ποικίλα υλικά, όπως πυριτόλιθο και διάφορα χρώματα. Για να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος πρέπει να θερμανθεί τόσο το υλικό όσο και η επιφάνεια στην οποία θα εφαρμοστεί. Όπως σημειώνεται στο (Κοοb, 1998)

4. Ασβεστοκονίαμα - Τσιμέντο - *Limeplaster – Cement*

Το ασβεστοκονίαμα αποτελούσε μια κοινή πρακτική στην αρχαιότητα και βοήθησε να διασφαλιστεί ότι οι σύνδεσμοι ήταν σωστά ασφαλισμένοι. Η εγκατάσταση διαρκεί πολύ, από 12 ώρες

έως και μια ολόκληρη μέρα, και κατά την διάρκεια αυτή τα αντικείμενα δεν πρέπει να μετακινούνται. Το ασβεστοκονίαμα χρησιμοποιείται στην ενίσχυση των γεμισμάτων σε δοχεία αποθήκευσης μεγάλου μεγέθους, τα οποία είναι κυρίως εκτεθειμένα σε εξωτερικούς χώρους. Τα υλικά που αναφέρονται παραπάνω είναι ιδιαίτερα επιβλαβή για τα κεραμικά αντικείμενα καθώς μεταφέρουν άλατα, καθώς και του επιπλέον βάρους όπου μπορεί να προκαλέσει καταπόνηση. Αυτά τα υλικά είναι δύσκολο να αντιστραφούν και να αφαιρεθούν χωρίς να σημειωθεί ζημιά στο αγγείο. (Koob, 1998)

5. Υλικά κυτταρίνης - Cellulosic Materials.

Υλικά κυτταρίνης όπως το χαρτί χρησιμοποιήθηκαν από τα μέσα του 19ου έως τις αρχές του 20ου αιώνα. Το χαρτί μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, όπως φύλλα χαρτιού, κομμάτια χαρτιού, αναμειγμένα με διάφορα υλικά (π.χ. κόλλες), λιναρόσπορο, νέφτι, για τη δημιουργία πολτού κατάλληλου για γέμιση κενών. Εφημερίδες ή άλλα υλικά με βάση το χαρτί θα μπορούσαν να έχουν χρησιμοποιηθεί ως υλικό υποστήριξης, ενώ υπολείμματα χαρτιού έχουν βρεθεί μέσα σε κεραμικά αγγεία, υποδηλώνοντας ότι το χαρτί χρησιμοποιήθηκε ως πληρωτικό. Το χαρτί που χρησιμοποιήθηκε παρείχε πληροφορίες για τη χρονολογία της αποκατάστασης σε πολλές περιπτώσεις (Rathgen, 1905). Ο Plenderleith προτείνει ότι σε περιπτώσεις όπου ένα αντικείμενο αποτελείται από πολλά βαριά θραύσματα, τα τοιχώματα θα πρέπει να ενισχυθούν με υλικό πλήρωσης, μαζί με επιδέσμους από βαμβάκι στην εσωτερική πλευρά του αγγείου. Οι επίδεσμοι βυθίστηκαν σε διάλυμα γομαλάκας, κόλλας, γύψου ή κεριού (Koob, 1998).



Εικόνα 16 Επίδεσμοι εμπλουτισμένοι με ζωική κολλά που δρούσε ως συμπλήρωμα σε αγγείο (Koob, 1998) .

6. Ρητίνη κόμμι – Gutta-Percha

Η φυσική ρητίνη αυτή είναι αποτελεί ένα πολυμερές προϊόν διάφορων τροπικών φυτών, συμπεριλαμβανομένων των καουτσούκ. Γνωστό και ως γουταπέρκα ή καουτσούκ, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ποικίλες εφαρμογές. Αυτό το υλικό χρησιμοποιήθηκε ως πληρωτικό και συνδετικό μέσο στα τέλη του 19^{ου} αι. ως και τις αρχές του 20^{ου} αι. . Χαρακτηρίζεται από το ότι είναι παχύρρευστο και δρα ως κόλλα όταν είναι θερμό ενώ μετατρέπεται σε αρκετά άκαμπτο υλικό κατά την ψύξη. Ωστόσο, παρατηρείται να είναι αρκετά δύσκολο να δουλέψει κανείς. Έχει σκούρο χρώμα αλλά μπορεί να ξεθωριάσει με το πέρασμα του χρόνου (Koob, 1998). Το ελαστικό κόμμι είναι ιδιαίτερα πιθανό να

διασπαστεί και να γίνει εύθραυστο λόγω οξείδωσης και διπολυμερισμού. Σε ορισμένες περιπτώσεις, παλιά γεμίματα που έχουν κατασκευαστεί με συγκεκριμένα υλικά μπορεί να χρειαστεί να αφαιρεθούν και να αντικατασταθούν. (Koob, 1998) (Thornton, 1998)

7. Νιτροκυτταρίνη - Nitrocellulose

Η κυτταρίνη αυτή ήταν γνωστή στον τομέα της διατήρησης από τις αρχές του 19ου αιώνα (Horie, 1998). Ένα υλικό γνωστό ως πλαστικό ξύλο μπορεί να κατασκευαστεί αναμειγνύοντάς το με πριονίδι. Η νιτρική κυτταρίνη τείνει να είναι ασταθής, να συρρικνώνεται με την πάροδο του χρόνου και μπορεί επίσης να γίνει κίτρινη και εύθραυστη. Η χρήση της έχει μειωθεί σημαντικά με την ανάπτυξη συνθετικών συγκολλητικών όπως ο οξικός πολυβινυλεστέρας και τα ακρυλικά. (Koob, 1998)

8. Οξική κυτταρίνη - Cellulose Acetate

Η κυτταρίνη αυτή, παρόμοια με τη νιτροκυτταρίνη, παρουσιάστηκε ως σκληρυντικό υλικό σε γεμίματα από τη δεκαετία του 1920 έως τη δεκαετία του 1980. Σε θερμοκρασίες δωματίου παρατηρείται οξείδωση της κυτταρίνης ενώ ταυτόχρονα χαρακτηρίζεται ευαίσθητη στην υγρασία. (Koob, 1998)

9. Πολυεστερική ρητίνη- Polyester Resin

Η πολυεστερική κόλλα και ρητίνη έχει χρησιμοποιηθεί κατά την διάρκεια του 20^{ου} αι. για την πλήρωση αντικειμένων κεραμικής, πορσελάνινα αντικείμενα, καθώς και αντικείμενα γυαλιού (André, 1976). Με σκοπό την αύξηση της αντοχής τους, χρησιμοποιήθηκαν συχνά μαζί με υαλοβάμβακα. Ο υαλοβάμβακας είναι ένα υλικό που είναι γνωστό για την ανθεκτικότητα και την αντοχή του σε φθορές, επομένως ο συνδυασμός του με σκυρόδεμα μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία ενός ακόμα πιο ανθεκτικού τελικού προϊόντος. Οι πολυεστέρες παρουσιάζουν ωστόσο μερικά μειονεκτήματα, όπως ότι είναι επιρρεπείς σε συρρίκνωση και το γεγονός ότι δεν είναι αναστρέψιμοι από την στιγμή που θα πολυμεριστούν. Τα μη διαλυόμενα υλικά μετά τον πολυμερισμό σχηματίζουν μια δικτυωτή δομή στο χώρο. Είναι δύσκολο να αφαιρέσουμε αυτά τα υλικά χωρίς να καταστρέψουμε το κεραμικό αντικείμενο (Koob, 1998).



Εικόνα 17 Κομμάτι αγγείου με παρουσία πολυεστερικής ρητίνης και ίνες γυαλιού (Koob, 1998).

10. Πολυμερές βινυλίου - Polyvinylacetate Puttie

Από την αρχή του 20ου αιώνα, τα πολυμερή βινυλίου συνδυάζονταν με πηλό ώστε να παραχθεί ένα εύπλαστο υλικό που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στις κατασκευές. Καθώς αυτό το μείγμα σκλήρυνε, μετατρεπόταν σε πολύ σκληρό και δυνατό. Τα πολυμερή βινυλίου έχουν συνδυαστεί με ποικίλα υλικά και χρώματα ώστε να σχηματίσουν μια πάστα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό πλήρωσης (André, 1976). Είναι διαλυτά στους περισσότερους διαλύτες και ανθεκτικά στην αποικοδόμηση. Το κύριο μειονέκτημα της χρήσης πολυμερών που σκληρύνονται με υπεριώδη ακτινοβολία είναι ότι η ρητίνη μπορεί να κιτρινίσει με την πάροδο του χρόνου όταν εκτίθεται περεταίρω στην υπεριώδη ακτινοβολία. Η γήρανση του υλικού με την πάροδο του χρόνου επηρεάζεται επίσης από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. Οι τελευταίες παρατηρήσεις οδήγησαν στην ανάπτυξη ακρυλικών προϊόντων ως εναλλακτική λύση στα προϊόντα βινυλίου (Koob, 1998).

11. Αλοιφή AJK ή BJK- AJK or BJK dough

Αυτή η πάστα πλήρωσης είναι ένα μείγμα από νερό και ρητίνες βινυλίου, καολίνης και ίνες γιούτας που προστίθενται ως πληρωτικό. Αυτή η ουσία χρησιμοποιήθηκε ως πάστα κατά τις δεκαετίες του 1960 και του 1970. Οι συνθέσεις AJK και BJK αποτελούνται και οι δύο από ένα συνθετικό πολυμερές (Alvar ή Butvar, αντίστοιχα), ίνες γιούτας και άργιλο καολίνης. Αφού παρασκευαστεί το μείγμα, ο διαλύτης εξατμίζεται μέχρι το μείγμα να στεγνώσει και να σκληρύνει. Εάν το θραύσμα που αποκαθίσταται είναι παχύ, το υλικό εφαρμόζεται σε λεπτές στρώσεις έτσι ώστε κάθε στρώμα να μπορεί να στεγνώσει πριν από την εφαρμογή του επόμενου στρώματος. Αυτή η διαδικασία μειώνει τον ρυθμό συρρίκνωσης του υλικού. Αφού τοποθετηθούν τα κομμάτια, υπολειπόμενα μέρη γεμίζονται με αλοιφή και αφού στεγνώσει το υλικό, τα τυχόν κενά γεμίζονται με εναπόθεση νέου υλικού. Αυτό το υλικό χαρακτηρίζεται ως θερμοπλαστικό, που σημαίνει ότι μπορεί να αναπλαστεί με την αύξηση της θερμοκρασίας. Έπειτα από την εναπόθεση του υλικού, το τμήμα της επιφάνειας που τοποθετήθηκε πρέπει να υγρανθεί με ένα διαλύτη και στη συνέχεια να γυαλιστεί με μια σπάτουλα. Αφού στεγνώσει η επιφάνεια, θα πρέπει να τρίβεται και μετά να βάφεται όπως είναι επιθυμητό. Το 1980, το Άλβαρ αντικαταστάθηκε από το Μπουτβάρ, το οποίο είχε τα ίδια

χαρακτηριστικά. Ο JM Cronyn παρατηρεί ότι αυτό το υλικό τείνει να συρρικνώνεται με την πάροδο του χρόνου και κατά την λανθάνουσα χρήση του, υπάρχει περίπτωση φθοράς των κελυφών μέσα σε λίγες εβδομάδες. Ως εκ τούτου αντικαταστάθηκε από το Butnar, το οποίο είχε ακριβώς τις ίδιες ιδιότητες (Koob, 1998). Σύμφωνα με τη μελέτη, το Butnar είχε τα ίδια χαρακτηριστικά με το υλικό που αντικαταστάθηκε (Cronyn, 1990).



Εικόνα 18 Αγγείο στο οποίο έχουν γίνει κολλήσεις με αλοιφή ΑJK στις οποίες δεν έχουν παρατηρηθεί χρωστικές (Koob, 1998).

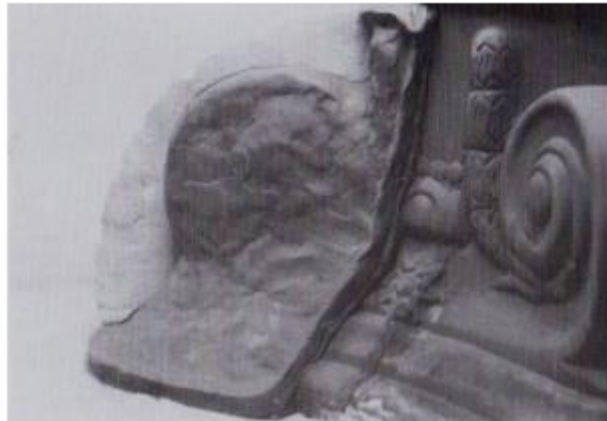
12. Γύψος.

Ο γύψος είναι ένα κοινό υλικό που χρησιμοποιείται για την πλήρωση κεραμικών αγγείων, επειδή αφαιρείται εύκολα, είναι μηχανικά πιο αδύναμο από το ίδιο το βάζο και σταδιακά διαλύεται στο νερό. Ο γύψος, ευρύτερα γνωστός ως Plaster of Paris, είναι ένα φυσικό ορυκτό που αποτελείται από θειικό ασβέστιο. Ο γύψος μπορεί να κονιοποιηθεί σε σκόνη, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές. Πήρε το όνομά του επειδή βρίσκεται στη συνοικία του Παρισιού. Ο γύψος είναι διαθέσιμος παγκοσμίως, είναι φθηνός, σκληραίνει με γρήγορους ρυθμούς και υπάρχει δυνατότητα να υποστεί επεξεργασία με ποικίλους τρόπους. Αφού το σκυρόδεμα στερεοποιηθεί, διαστέλλεται ελαφρά κατά 1 έως 2%. Ωστόσο, μόλις σκληρύνει, γίνεται πρακτικά αδρανές. Μελέτες που διερευνούν τη συμβατότητα διαφόρων υλικών πλήρωσης με κεραμικά υλικά έχουν βρει ότι ο συντελεστής θερμικής διαστολής του γύψου είναι πλησιέστερος με αυτόν των κεραμικών, συγκριτικά με άλλα υλικά πλήρωσης, όπως ακρυλική, εποξειδική και πολυεστερική ρητίνη (Λαμπρόπουλος, 1996). Το κύριο μειονέκτημα του γύψου είναι ότι αποτελεί σημαντική πηγή θεικών αλάτων. Αυτά τα θειικά άλατα μπορούν να διεισδύσουν στους πόρους και τα τριχοειδή αγγεία των κεραμικών υλικών και κάτω από τις κατάλληλες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας, μπορούν να κρυσταλλωθούν και να προκαλέσουν διάβρωση. Ωστόσο, σε περιπτώσεις λείων κεραμικών, όπως φαγεντιανή, λιθοδομή και πορσελάνη, γίνεται χρήση οδοντικών εμπλάστρων, όπως moldano, gessodi Bologna, Giluforn, Gildent κ.λπ. Αυτά τα οδοντικά εμπλάστρα χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν μια πιο ακριβή αναπαράσταση των δοντιών. (Λαμπρόπουλος, 1996)

Υπάρχουν δύο κοινές μέθοδοι για την εφαρμογή του προαναφερθέντος υλικού: (1) εναπόθεση του υλικού στον αέρα, με ένα τοίχος από κερί ή φύλλα πηλού και (2) δημιουργία χωριστών,

αφαιρούμενων κελυφών που είναι προσαρμοσμένα στο πρότυπο μέρος. Αυτά τα κελύφη τοποθετούνται στη συνέχεια σε περιοχές απώλειας. Ο τρόπος εργασίας προσαρμόζεται κάθε φορά ανάλογα με τη θέση της γέμισης. Για την πλήρωση κενών στην κοιλιά των αγγείων, ο σοβάς τοποθετείται από έξω, ακουμπώντας στην επιφάνεια από ένα φουσκωμένο μπαλόνι. Το μπαλόνι γεμίζει το εσωτερικό του αγγείου ακολουθώντας την γεωμετρία του. Στη συνέχεια εναποθέτεται ο σοβάς στην εσωτερική πλευρά του αγγείου. Σε περίπτωση που απαιτούνται πιο λεπτομερείς πληροφορίες για την κεραμική επιφάνεια, τα εκμαγεία κατασκευάζονται από γύψο ή λάστιχο σιλικόνης. (Λαμπρόπουλος, 1996)

Εάν δεν υπάρχει κανένα σωζόμενο κομμάτι απέναντι από το κομμάτι που λείπει, το γύψινο καλούπι είναι κατασκευασμένο από την αρχή από πηλό ή πλαστελίνη όπου χρησιμοποιούνται ως καλούπι για τον γύψο. Αφού αφαιρεθεί το γύψινο καλούπι, μπορεί να αφαιρεθεί η πλαστελίνη. Στη συνέχεια, το καλούπι εναποτίθεται στο σημείο του υπολειπόμενου κομματιού και γίνεται χύτευση του υλικού της επιλογής του συντηρητή για να γεμίσει το τμήμα που λείπει. Το ζεστό σαπουνόνερο χρησιμοποιείται ως μονωτήρας μεταξύ του καλουπιού γύψου και του υλικού χύτευσης. Αυτό βοηθά στο να αποτραπεί η προσκόλληση του υλικού χύτευσης στο καλούπι. Προκειμένου να αναπαραστηθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι λεπτομέρειες του τμήματος του κεραμικού που αντιγράφεται, χρησιμοποιείται συχνά ένα καλούπι από καουτσούκ σιλικόνης. Το γύψινο περιτύλιγμα εφαρμόζεται σε σιλικόνη υψηλής υγρότητας. Συμπληρώνουμε τα κενά με νέο γύψο ή άλλο υλικό χύτευσης, το οποίο αντικαθιστά το τμήμα που λείπει. (Λαμπρόπουλος, 1996)



Εικόνα 19 Δημιουργία καλουπιού από σιλικόνη από αντίστοιχο τμήμα του αντικειμένου. (Λαμπρόπουλος, 1996)



Εικόνα 20 Τελικό αποτέλεσμα, έπειτα από τη χύτευση γύψου στο καλούπι σιλικόνης (Λαμπρόπουλος, 1996).

Προκειμένου να καλυφθούν μεγάλα κενά, η διαδικασία γίνεται σε φάσεις αποτυπώνοντας διαδοχικά τμήματα κεριού. Οι εργασίες πλήρωσης γίνονται με προσοχή ώστε οι γειτονικές επιφάνειες να μην λερώνονται από τα υλικά που χρησιμοποιούνται. Η περίσσεια του σοβά απομακρύνεται με σπάτουλα ενώ το υλικό είναι ακόμα εύπλαστο, μειώνοντας το τρίψιμο που καταπονεί το αντικείμενο. Το οδοντικό κεριό μπορεί να προσκολληθεί στην κεραμική επιφάνεια επειδή είναι πορώδες. Ένας τρόπος για να αποφύγουμε αυτό το πρόβλημα είναι να θερμανθεί λιγότερο το κεριό πριν δημιουργηθεί το αποτύπωμα ή να απλωθεί ένα λεπτό στρώμα ταλκ μεταξύ του κεριού και του κεραμικού. Αφού σκληρυνθούν οι επιφάνειες του γύψου, λειαινούνται με γυαλόχαρτο διαφόρων ποιότητων. Οι επιθυμητές καμπύλες επιτυγχάνονται με τη χρήση πλευρικού φωτισμού. Το τελικό καθάρισμα κάποιων λεκέδων από γύψο, που έχουν μείνει σε σημεία γύρω από τη γέμιση, αποσπώνται με μια κλασική γόμα σχεδίων. Αυτό συμβαίνει γιατί η χρήση νερού δεν καθαρίζει τους λεκέδες, αλλά απλώς τους μετακινεί στη βάση του πορώδους κεραμικού (Λαμπρόπουλος, 1996).

Μια διαφορετική τεχνική που προτάθηκε πρόσφατα για την δημιουργία αποσπώμενων αποκαταστάσεων γύψου είναι η εξής. Η αποτύπωση του τοιχώματος του αγγείου γίνεται με οδοντικό κεριό ή υγρό γύψο, το οποίο πλαθόταν μαζί με ξηρό γύψο και μαλάκωνε σε ζεστό νερό με σκοπό την αποφυγή λιπαρού λεκέ στο κεραμικό. Τα τοιχώματα που θα γεμίσουν με το υλικό απομονώνονται χρησιμοποιώντας διάλυμα Paraloid B72 σε ακετόνη. Στη συνέχεια πλένονται με μη ιοντικό απορρυπαντικό. Τα υπερηχητικά κύματα μπορούν να αποτρέψουν την προσκόλληση του γύψου στις επιφάνειες. Μόλις σκληρύνει η γέμιση, αφαιρείται το κομμάτι γύψου και αφαιρείται το απορρυπαντικό από τον σοβά και το κεραμικό. Αυτό αφήνει μια καθαρή επιφάνεια που είναι έτοιμη να βαφτεί ή να γυαλιστεί. Το νέο κέλυφος αλέθεται και αποκαθίσταται μακριά από το κεραμικό για να αποφευχθεί η φθορά. Αυτό μπορεί να διορθωθεί βυθίζοντας το αντικείμενο σε διάλυμα Paraloid B72 10% v/v. Μουλιάζουμε το αντικείμενο σε ασετόν για 10-20 λεπτά μέχρι να κορεστεί πλήρως. Αφού στεγνώσει, λιώνεται στο δοχείο με την ίδια ρητίνη και ενσωματώνεται ως δικό του κέλυφος. Αυτή η μέθοδος προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως ταχύτητα, ασφάλεια, ανθεκτικότητα και αναστρεψιμότητα (Λαμπρόπουλος, 1996).

Ένα άλλο προϊόν που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πληρωτικό είναι το Polyfilla, το οποίο βασίζεται στο θειικό ασβέστιο. Αυτός ο τύπος επένδυσης τοίχων είναι κατασκευασμένος από γύψο,

που το καθιστά πιο απαλό και ευκολότερο να αφαιρεθεί με νερό. Το Polyfilla είναι ένα μείγμα υδατοδιαλυτής κυτταρίνης και γύψου. Δεν εμφανίζει συσπάσεις και διαστολές. Είναι ανθεκτικό στη θερμότητα. Τέλος, άλλα υλικά πλήρωσης που χρησιμοποιούνται για την πορσελάνη και την φαγεντιανή περιλαμβάνουν συνθετικές ρητίνες. Ένα μείγμα πολυεστέρα, εποξειδικού και PVA με λευκά πυριτικά υλικά και χρωστική επιφάνειας έχει ως αποτέλεσμα μια έγχρωμη επιφάνεια. Το Sylmasta είναι ένα από τα κύρια υλικά που χρησιμοποιούνται σε αυτή την κατηγορία. Η εποξειδική ρητίνη είναι ένας τύπος υλικού πλήρωσης που αποτελείται από δύο μέρη: την ίδια τη ρητίνη, που είναι συνήθως το επιθυμητό χρώμα, και το σκληρυντικό, που προκαλεί τη σκλήρυνση της ρητίνης. Και τα δύο εξαρτήματα είναι σε στερεή κατάσταση. Πλάθονται σε αναλογία 1:1 για να πάρουν το κατάλληλο σχήμα για γέμιση. Αφού σκληρυνθεί το υλικό, είναι πιο δύσκολο να λειανθεί και είναι καλύτερο να χρωματιστεί (Λαμπρόπουλος, 1996).

Το Milliput είναι ένα άλλο υλικό αυτής της κατηγορίας που είναι κατασκευασμένο από εποξειδική ρητίνη και αδρανή. Παρέχεται σε αναλογία 1/1 των δύο συστατικών και είναι εξίσου δύσκολο να λειανθεί μετά τη σκλήρυνση, κατά προτίμηση έγχρωμο (Λαμπρόπουλος, 1996).

Σύμφωνα με την πηγή (Λαμπρόπουλος, 1996), το Pliacre είναι ένας τύπος πληρωτικού που κατασκευάζεται από εποξειδική ρητίνη και αδρανή.

Το Sebralit είναι μια εποξειδική ρητίνη που ανήκει στην ίδια κατηγορία με τις άλλες ρητίνες που αναφέρθηκαν. Αυτό το προϊόν μπορεί να βρεθεί σε δυο χρώματα (άσπρο και διαφανή) και δύο μορφές (λεπτό και χοντρό). Τα δυο υλικά αναμειγνύονται με αναλογία δέκα προς ένα και η διαδικασία σκλήρυνσης ολοκληρώνεται σε λίγα λεπτά. Ωστόσο, κατά τη διαδικασία σκλήρυνσης, παρατηρείται σημαντική συρρίκνωση. Εάν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη επιφάνεια, θα δημιουργηθούν ρωγμές. Το πρόβλημα μπορεί να λυθεί εφαρμόζοντας σταδιακά την ολοκλήρωση σε τρεις μικρές ενότητες. (Λαμπρόπουλος, 1996)

Τα τελευταία δέκα χρόνια, μια σειρά από συνθετικά υλικά έχουν χρησιμοποιηθεί ως πληρωτικά και επιφανειακές επεξεργασίες κεραμικών αντικειμένων στα ελληνικά μουσεία. Τη δεκαετία του 1990, στη Βρετανία και τις ΗΠΑ, τα αρχαία αγγεία γέμισαν με συνθετικά υλικά σε διάφορους συνδυασμούς, είτε τοπικά είτε σε μεγάλες τομές. Από τη δεκαετία του 1950, ξένα μουσεία χρησιμοποιούν συνθετικές ρητίνες, όπως η ακρυλική ρητίνη Paraloid B72. Στα πρώτα στάδια αυτής της διαδικασίας, το υλικό πλήρωσης ενισχύθηκε με ίνες γυαλιού. Στις αρχές και στα μέσα της δεκαετίας του 1990, τα πληρωτικά πολυεστέρα δοκιμάστηκαν σε κεραμικά υψηλής καύσης, κυρίως πορσελάνη, στο Βρετανικό Μουσείο. Μία από τις πρώτες αναφορές χρήσης εποξειδικής ρητίνης ως υλικό πλήρωσης προέρχεται από το Plenderleith το 1957. Στη δεκαετία του 1990, οι εποξειδικές ρητίνες και οι κρέμες δοκιμάστηκαν συστηματικά και εφαρμόστηκαν ως υλικά συμπλήρωσης. Μια ειδική σύνθεση ενός μίγματος γαλακτώματος εποξειδικού που περιέχει σκόνη ψημένου αργίλου, μικροσφαιρίδια γυαλιού και υδρίδιο του πυριτίου ως ενοποιητικό στοιχείο χρησιμοποιείται για την πλήρωση δοχείων από το 1984 στη Αγγλία. (Γεωργάκη, 2012)

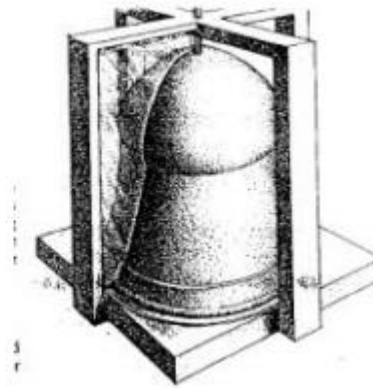
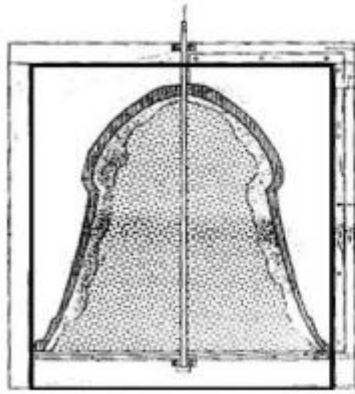
Σε περιπτώσεις που τα δοχεία έχουν χαμηλό πορώδες, προτιμώνται τα συνθετικά υλικά πλήρωσης λόγω της συμβατότητάς τους και την αντοχή που παρουσιάζουν. Η προσθήκη συνθετικών υλικών σε άλλα υλικά μπορεί να βελτιώσει τις ιδιότητες των προϊόντων και να κάνει την αισθητική αποκατάσταση πιο αποτελεσματική. Οι συνθετικές ρητίνες που χρησιμοποιούνται ως πληρωτικά σε πορσελάνη και φαγεντιανή αναμειγνύονται τυπικά με άσπρα υλικά πλήρωσης όπως το οξείδιο του τιτανίου, θειικό βάριο και καολίνη. Σε αρκετές περιπτώσεις, τα συνθετικά πληρωτικά αναμειγνύονται

με χρωστικές για να δημιουργήσουν το επιθυμητό χρώμα. Πρόκειται για εξαιρετικά σκληρά και πυκνά υλικά που είναι μη αναστρέψιμα και αδύνατο να αφαιρεθούν από το αρχικό υλικό, ανεξάρτητα από τη μέθοδο εφαρμογής, τη γνώση, την επιμέλεια ή την εμπειρία του συντηρητή. Υπάρχει ένας τεράστιος αριθμός συνθετικών υλικών και μεθόδων που μπορούν να χρησιμοποιήσουν οι συντηρητές για την επεξεργασία αντικειμένων πολιτιστικής κληρονομιάς (Γεωργάκη, 2012).

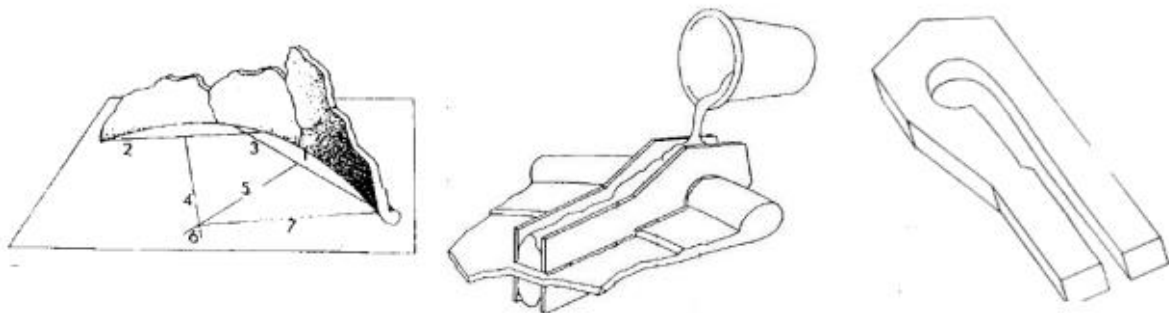
Ο καλλιτεχνικός γύψος χρησιμοποιείται συχνά για αγγεία με υψηλό πορώδες και μαλακό σώμα, καθώς θεωρείται καταλληλότερο υλικό συγκριτικά με την συνθετική ρητίνη. Σε πολλές κατηγορίες αρχαίας κεραμικής, όπως η ελληνική κεραμική, η μεσαιωνική εφυσάλωμένη κεραμική, η terra sigillata και η χειροποίητη προϊστορική κεραμική, χρησιμοποιείται συνήθως ο γύψος ως υλικό πλήρωσης. Δεδομένου ότι οι πορσελάνες ισλαμικής, φαγεντιανής και κινέζικης έχουν μικρό πορώδες και στερεά υαλοποιημένα σώματα, θεωρείται προτιμότερη η χρήση συνθετικών υλικών, καθώς οι υψηλές μηχανικές αντοχές των δύο βασικών κεραμικών σωμάτων είναι συμβατές (Γεωργάκη, 2012).

Κατά τη διάρκεια της ιστορίας, ο τομέας της συντήρησης γνώρισε μια συνεχή ανάπτυξη σε υλικά και τεχνικές. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η μέθοδος «τραβηχτού καλουπιού», κατά την οποία ένα αντικείμενο γεμίζει περιστρέφοντάς το γύρω από έναν άξονα. Η μέθοδος βασίζεται στην τέχνη της καμπάνας των μέσων του 18ου αιώνα, παρά την αρχαιότητά της. Συχνά εφαρμόζεται για τη συντήρηση πλοίων ή όπου έχουν διασωθεί συντρίμμια από διάφορα μέρη ενός πλοίου, αλλά είναι ανεπαρκή για την ανακατασκευή του. Η αρχή αυτής της τεχνικής είναι να δημιουργηθεί ένα αντίγραφο του αρχαίου αντικειμένου σε γύψο ή άλλο συνθετικό υλικό, όπως εποξειδικές ρητίνες, πρώτα στήνοντας προσωρινά το δοχείο από υπάρχοντα θραύσματα και παίρνοντας ένα αποτύπωμα. Το κομμάτι του αρχαίου αγγείου που λείπει έχει υπολογιστεί και αποκοπεί από αντίγραφο και έχει προσαρμοστεί στο πρωτότυπο. Η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί σε μια ποικιλία αγγείων (Αλεξίου, 2008) (Αλεξίου, 2008).

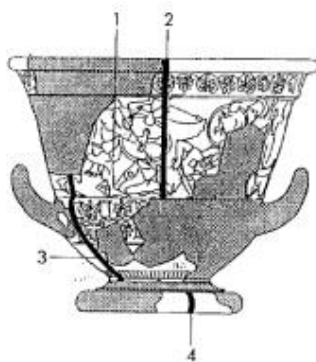
Μια παραλλαγή της τεχνικής κατάγραψε ο Williams το 1980, όταν πρότεινε μια περιστροφική μηχανή για την κατασκευή ρεπλικών αγγείων. Ο Η Μ. Elston ακολούθησε την μέθοδο του spinning στη συντήρηση μιας ερυθρόμορφης κύλικας και έτσι κατασκεύασε ένα αντίγραφο από ένα μείγμα εποξειδικής πάστας. Αυτό το αντίγραφο χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της κύλικας προκειμένου να διατηρηθεί καλύτερα το πρωτότυπο. Ο Μπάροφ ακολούθησε σχεδόν την ίδια διαδικασία για να συντηρήσει τον λεγόμενο «Κρατήρα του Κύκνου» του Ευφρόνιου, ο οποίος στεγάζεται στο Μητροπολιτικό Μουσείο Τέχνης της Νέας Υόρκης (Λαμπρόπουλος, 1996). Στην ολοκλήρωση αυτού του σκεύους απαγορευτική η χρησιμοποίηση γύψου. Χρησιμοποιώντας τα λίγα εναπομείναντα μέρη, δημιουργήθηκε ένα ολόκληρο κέλυφος από συνθετικά υλικά. Άνοιξαν κενά στο όστρακο και τα θραύσματα τοποθετήθηκαν στη θέση τους. Αυτό το κέλυφος κατασκευάστηκε από ένα φύλλο πλεξιγκλάς που κόπηκε για να ακολουθεί το ακριβές προφίλ του αγγείου (εικόνα 21). Το συνθετικό ομοίωμα κρατήρα κατασκευάστηκε από έναν πυρήνα αφρού πολυουρεθάνης, πλαστικό πηλό και δύο στρώσεις ακρυλικού Liqvitex, με εποξειδική πάστα Pliacre ενδιάμεσα. Η συνθετική περιοχή λειάνθηκε, επαλείφθηκε με χρώματα βινυλίου ανθεκτικά στην ακτινοβολία και γυαλίστηκε με μικροκρυσταλλικό κερί. Η επιφάνεια των αρχικών κομματιών του αγγείου προφυλάκτικε κατά τη διάρκεια της συντήρησης με ένα στρώμα υδατοδιαλυτής πολυβινυλικής αλκοόλης (Λαμπρόπουλος, 1996) (Baron, 1988).



Εικόνα 21 Στις παραπάνω εικόνες παρατηρούμε την τεχνική της περιστροφής. Τα συνθετικά υλικά έχουν έναν πυρήνα που μπορεί να προσαρμοστεί στον κατακόρυφο άξονα. Τα υλικά διαμορφώνονται περιστρέφοντας το ανακατασκευασμένο προφίλ (Baron, 1988).



Εικόνα 22: Η μέτρηση και η αναπαραγωγή των διαμέτρων του χείλους από υπάρχοντα θραύσματα μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με το αρχικό μέγεθος και σχήμα ενός αγγείου. Αυτές οι πληροφορίες είναι χρήσιμες για μελλοντική χρήση ώστε να δημιουργηθεί ένα πιο ακριβές καλούπι. (Baron, 1988).



Εικόνα 23: Αριστερά βλέπουμε τις μετρήσεις των αποστάσεων από τα διατηρημένα κελύφη που χρησιμοποιήθηκαν για την δημιουργία φορμών από τις περιοχές: 1) χείλος, 2 και 3) σώμα και 4) βάση. Δεξιά βλέπουμε, το αγγείο του Ευφρονίου «Κρατήρας Κύκνος». Οι εργασίες συντήρησης ολοκληρώθηκαν με τη μέθοδο της περιστροφής από ένα φύλλο πλεξιγκλάς (Baron, 1988) (Γεωργάκη, 2012).

Η τεχνική περιστροφής, ή η μέθοδος «τραβηχτού καλουπιού», είναι ένας τρόπος μελέτης και έκθεσης ιστορικών αντικειμένων χωρίς να διακυβεύεται η αυθεντικότητά τους. Αυτή η τεχνική προέκυψε από την ανάγκη να κατανοήσουμε καλύτερα την αξία τέτοιων αντικειμένων. Αυτή η προσέγγιση είναι συμβατή με τους ηθικούς κανόνες που έχουν αναπτυχθεί και καθιερωθεί στην επιστήμη της διατήρησης. Όσο αφορά τη διατήρηση, διασφαλίζει ότι τα αρχαία αντικείμενα γίνονται σεβαστά και ότι είναι σταθερά και ασφαλή κατά το χρονικό διάστημα της συντήρησης αλλά κατά την έκθεση ή αποθήκευση. Δεν επηρεάζεται η αρχαιολογική, διδακτική και αισθητική αξία του αντικειμένου. Χρησιμοποιείται συχνά στη συντήρηση αγγείων (Αλεξίου, 2008).

Ο «Κρατήρας του Ευφρονίου» είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης ποικίλων υλικών και τεχνικών από προηγούμενα παραδείγματα. Σε αυτή τη σύντομη ιστορική αναδρομή της διατήρησης αρχαίων κειμηλίων με επεμβάσεις στην αρχαιότητα, περιγράφεται μόνο μέρος της. Ο συντηρητής αξιολογεί την κατάσταση του αντικειμένου, την αναστρεψιμότητα τυχόν προτεινόμενων θεραπειών, την ευκολία χρήσης και την τοξικότητα των υλικών πριν αποφασίσει για τον καταλληλότερο συνδυασμό θεραπειών και υλικών. Οι αρχαιότερες επεμβάσεις συντήρησης που έγιναν σε ένα αρχαιολογικό κεραμικό εύρημα μπορούν να δώσουν σημαντικές ενδείξεις για την ιστορία του.

Οι συντηρητές παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες για τα υλικά, τις τεχνικές εφαρμογής και την κοινωνική ταυτότητα των ιδιοκτητών κάθε εποχής. Εντάσσονται σε ένα ευρύτερο πλαίσιο κοινωνικού, συμβολικού και αισθητικού χαρακτήρα, που σηματοδοτούν και αποτελούν την ιστορία του (Dooijes R., 2007).

1.4. Παραδείγματα τρισδιάστατης αναπαράστασης, συμπλήρωσης και εκτύπωσης έργα πολιτισμικής κληρονομιάς.

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, η τρισδιάστατη τεχνολογία χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για τη διατήρηση, την εκμετάλλευση και τη μετάδοση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Αυτό έχει αποφέρει σημαντικά αποτελέσματα και έχει μεγάλη σημασία για τη διασφάλιση της διατήρησης της πολιτιστικής μας κληρονομιάς για τις μελλοντικές γενιές. Η έλευση της τεχνολογίας τρισδιάστατης εκτύπωσης καθιστά δυνατή τη δημιουργία ακριβών αντιγράφων ιστορικών και αρχαιολογικών αντικειμένων, καθώς και την επισκευή και αποκατάσταση υπαρχόντων. Μερικές από τις πρώτες παρεμβάσεις αυτού του είδους είχαν αξιοσημείωτη επιτυχία.

1.4.1. Συμπλήρωση δύο ακέφαλων γύψινων γλυπτών.

Η ομάδα του Heritage Lab, μια ομάδα συντηρητών που δημιουργήθηκε μεταξύ του FabLab και του 3D Archeolab, παρουσίασε την πρώτη τρισδιάστατη ανακατασκευή της. Η ομάδα ειδικεύεται στον τομέα της διατήρησης της πολιτιστικής κληρονομιάς χρησιμοποιώντας μεθόδους και τεχνολογίες που σχετίζονται με την τρισδιάστατη εκτύπωση. Ο στόχος αυτής της μελέτης ήταν να διερευνήσει τις δυνατότητες χρήσης τεχνικών τρισδιάστατης απεικόνισης και τρισδιάστατης εκτύπωσης χαμηλού κόστους για την αποκατάσταση τμημάτων που λείπουν στη διατήρηση της πολιτιστικής κληρονομιάς. Αυτή η πρώτη προσπάθεια υλοποιήθηκε στο παρεκκλήσι της εκκλησίας «Castello di San Martino dall'

Argine», που χτίστηκε από τον Scipione Gonzaga το 1582. Η εκκλησία είναι ένα έργο σπουδαίας θρησκευτικής και αρχιτεκτονικής σημασίας στη περιοχή της Μάντοβας της Ιταλία. (Bigliardi, 2014)



Εικόνα 24 Τα δύο ακέφαλα χερουβείμ στον χώρο λατρείας του παρεκκλησίου της εκκλησίας του San Martino dall'Argine πιστεύεται ότι χρονολογούνται από τον 16ο αιώνα. (Bigliardi, 2014)

Ο χώρος λατρείας του ξωκκλησιού ήταν διακοσμημένος με γύψινη ανάγλυφη επένδυση που απεικόνιζε τέσσερα χερουβείμ, δύο από τα οποία ήταν ακέφαλα. Η πρόταση που παρουσιάστηκε ήταν για την πιθανή αποκατάσταση των δύο χαμένων κεφαλών γύψου με μια χαμηλού κόστους τεχνολογική προσέγγιση που θα επέτρεπε την αναπαραγωγή τους σε 3D. (Bigliardi, 2014)



Εικόνα 25 Τα τρισδιάστατα μοντέλα υπάρχοντος κεφαλιού και ημιτελούς σώματος ενός από τα δύο χερουβείμ από τη διακόσμηση. Το μοντέλο στη δεξιά φωτογραφία είναι το αποτέλεσμα του συνδυασμού των άλλων δύο φωτογραφιών. (Bigliardi, 2014)

Τα κεφάλια των δύο χερουβείμ που επέζησαν χρησιμοποιήθηκαν ως πρότυπα για να αναδημιουργηθούν τα κομμάτια που έλειπαν. Τα τρισδιάστατα μοντέλα δημιουργήθηκαν αρχικά χρησιμοποιώντας εργαλεία ανοιχτού κώδικα όπως Python Photogrammetry Toolbox και Meshlab.

Στη συνέχεια, το τρισδιάστατο μοντέλο προσαρμόστηκε στο πρόγραμμα ZBrush για να ταιριάζει τέλεια στο ακέφαλο γλυπτό (Εικόνα 25). Τέλος, οι δύο νέες κεφαλές εκτυπώθηκαν σε PLA (πολυμερές) χρησιμοποιώντας έναν εκτυπωτή Coobot 3D-PR 3D και τοποθετήθηκαν στα δύο ακέφαλα γλυπτά, έτσι ώστε να αποκατασταθεί η αρχική συνοχή της διακόσμησης (εικόνα 26,27). Το κίτρινο χρώμα επιλέχθηκε για να αυξηθεί η ορατότητα της συμπλήρωσης στο κοινό. Όλη η δράση έλαβε χώρα από τις 4 έως τις 7 Σεπτεμβρίου 2014 κατά τη διάρκεια μιας εκδήλωσης με τίτλο "Space 3D Revolution". Μετά την εκδήλωση αφαιρέθηκαν τα έντυπα. (Bigliardi, 2014)



Εικόνα 26 Το δεξί χερουβείμ πριν και μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας (Bigliardi, 2014).



Εικόνα 27 Το αριστερό χερουβείμ πριν και μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας (Bigliardi, 2014).

Παρατηρούμε ότι στο αριστερό χερουβίμ δεν κατάφερε να γίνει ολοκληρωμένη η συμπλήρωση λόγω της αναστροφής που έπρεπε να γίνει και της λειψής δεδομένων.

1.4.2. Συμπλήρωση προσώπου ρωμαϊκού κράνους.

Ο Ronny Meijers, ένας τεχνικός αρχαιολογικής αποκατάστασης με έδρα το Arnhem, χρησιμοποίησε τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης για να αποκαταστήσει ένα τεχνούργημα από τη συλλογή του Μουσείου Valkhof στο Nijmegen. Το τεχνούργημα είναι ένα προσωπίο από ένα ρωμαϊκό κράνος. Το κράνος βρέθηκε κατά τη διάρκεια ανασκαφών σε αρχαίο στρατιωτικό στρατόπεδο τη δεκαετία του 1980. Το προσωπίο του κράνους είχε μια ρωγμή στην αριστερή πλευρά (εικ. 28).

Σε συνεργασία με τη συνάδελφό του Vivianne Veenemans, σάρωσαν τη μάσκα στο σωζόμενο τμήμα της προκειμένου να δημιουργήσουν μια ψηφιακή τρισδιάστατη μορφή της. Στη συνέχεια, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν τρισδιάστατη εκτύπωση για να δημιουργήσουν ένα μοντέλο του κομματιού που έλειπε, το οποίο αντιστράφηκε και συρράφηκε στο σημείο της απώλειας. Για να δημιουργήσουν ένα ψηφιακό μοντέλο του αντικειμένου, χρησιμοποίησαν έναν τρισδιάστατο σαρωτή και το συνοδευτικό του λογισμικό. Η διαδικασία σάρωσης ήταν επιτυχής λόγω της φορητότητας της συσκευής σάρωσης, η οποία της επέτρεπε να κινείται ελεύθερα γύρω από το αντικείμενο (εικ.28,29). (Arnoldas, 2015)



Εικόνα 28 Προσωπίο Ρωμαϊκού κράνους και το εκτυπωμένο κομμάτι συμπλήρωσης του (Arnoldas, 2015).



Εικόνα 29 Διαδικασία σάρωσης του Ρωμαϊκού προσώπου (Arnoldas, 2015).

Μετά την ολοκλήρωση του τρισδιάστατου μοντέλου, το κομμάτι τυπώθηκε χρησιμοποιώντας έναν εκτυπωτή jetting binder. Στη μέθοδο εκτόξευσης συνδετικού υλικού, ένας κύλινδρος μετακινεί το υλικό σε σκόνη από ένα δοχείο στην πλατφόρμα κατασκευής. Μια κεφαλή εκτύπωσης εναποθέτει έναν τύπο υγρής κόλλας στα επιθυμητά σημεία εκτύπωσης. Η δεξαμενή υλικού ανεβαίνει ένα επίπεδο και ο κύλινδρος μεταφέρει το νέο στρώμα υλικού στην πλατφόρμα κατασκευής, η οποία έχει ήδη μετακινηθεί ένα επίπεδο προς τα κάτω για να εκτυπώσει το επόμενο στρώμα. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε νέο στρώμα. Το τελικό αντικείμενο σχηματίζεται με την ένωση των στρώσεων υλικού μεταξύ τους στα σημεία που έχει πέσει η κόλλα. (B. & et.al., 2008)

Ο εκτυπωτής είχε τη δυνατότητα να εκτυπώνει σε επίπεδα μικρότερα από 0.1 mm, κάτι που δεν καθιστά προφανές με γυμνό μάτι ότι το αντικείμενο είναι προϊόν εκτύπωσης 3D. Ο εκτυπωτής έχει το πλεονέκτημα ότι χρησιμοποιεί πούδρα ως υλικό στήριξης, το οποίο επιτρέπει την εκτύπωση οποιουδήποτε εξαρτήματος σε οποιαδήποτε γωνία. Το ελάχιστο πάχος του εκτυπωμένου γεμίσματος ήταν δύο χιλιοστά για να είναι ανθεκτικό. (Arnoldas, 2015)



Εικόνα 30: Το προσωπίό και το πληρωτικό εκτυπωμένο αντικείμενο τοποθετημένα έτσι ώστε να σημειωθούν τα μέρη που θα αφαιρεθούν. (Arnoldas, 2015)



Εικόνα 31 Το τελικό προϊόν μετά την κόλληση του πληρωτικού εκτυπωμένου αντικειμένου και την βαφή του. (Arnoldas, 2015)

1.4.3. Συμπλήρωση κεραμικού λέοντα.

Ένα παράδειγμα της ανακατασκευής ενός αρχαίου αντικειμένου έχει δοθεί από τους αρχαιολόγους Joseph Greene και Adam Aja του Πανεπιστημίου του Χάρβαρντ. Η ομάδα χρησιμοποίησε τρισδιάστατους εκτυπωτές και λογισμικό τρισδιάστατης σάρωσης για να αναδημιουργήσει ένα κεραμικό λιοντάρι που καταστράφηκε πριν από 3.000 χρόνια κατά την επίθεση των Ασσυρίων στην αρχαία πόλη Nuzi στη Μεσοποταμία (σημερινό Ιράκ).



Εικόνα 32 Τρισδιάστατη απεικόνιση των σαζόντων τμημάτων του κεραμικού λέοντα (JOE, 2012).

Η ομάδα του Χάρβαρντ χρησιμοποίησε μια διαδικασία που ονομάζεται φωτογραμμετρία για να φωτογραφίσει τα θραύσματα του γλυπτού από εκατοντάδες γωνίες προκειμένου να δημιουργήσει τρισδιάστατες αποδόσεις κάθε μέρους. Στη συνέχεια, η ομάδα χρησιμοποίησε τις φωτογραφίες για να δημιουργήσει ένα τρισδιάστατο μοντέλο του αντικειμένου, αν και δεν ήταν πλήρες. Οι ερευνητές συνέκριναν το ψηφιακό μοντέλο με σαρώσεις πανομοιότυπων, ανέπαφων αγαλμάτων που βρέθηκαν στην ίδια τοποθεσία. Αυτό τους επέτρεψε να προσδιορίσουν την ακρίβεια του μοντέλου και να κάνουν τις απαραίτητες προσαρμογές. Αφού εντόπισαν τα κενά στη δομή, χρησιμοποίησαν ένα σύστημα ελέγχου CNC για να παράγουν τα κομμάτια που λείπουν από αφρό και εξαρτήματα που εκτυπώθηκαν με 3D εκτυπωτή. (JOE, 2012)



Εικόνα 33: Τελικό εκτυπωμένο αντίγραφο του λέοντα (JOE, 2012).



Εικόνα 34 Διαδικασία σάρωσης του τελικού αντιγράφου (JOE, 2012).

1.4.4. Ανακατασκευή και συμπλήρωση κατεστραμμένου τμήματος λίθινης προτομής.

Το Ινστιτούτο Ερευνών Αποκατάστασης της Ρώμης, σε συνεργασία με τη συριακή κυβέρνηση, ανέλαβε την αποκατάσταση δύο ταφικών προτομών, ενός άνδρα και μίας γυναίκας, που προέρχονταν από την αρχαία πόλη της Παλμύρας. Τα ασβεστολιθικά γλυπτά, που χρονολογούνται στον 2ο ή 3ο αιώνα μ.Χ., υπέστησαν βανδαλισμούς το 2015.



Εικόνα 35 Η ταφική προτομή του ανδρικού ομοιώματος μετά τους βανδαλισμούς (Valentina Di Donato, 2017).



Εικόνα 36 Μεγεθηνση του κατεστραμμένου τμήματος του ομοιώματος (Valentina Di Donato, 2017).

Η ομάδα που ανέλαβε την αποκατάσταση, με επικεφαλής τον συντηρητή Antonio Iaccarino Idelson, αποφάσισε να χρησιμοποιήσει ψηφιακή τεχνολογία για να αποκαταστήσει τις κατεστραμμένες γλυπτικές επιφάνειες με τρισδιάστατα αντίγραφα εκτός από τη συγκόλληση και την αισθητική αποκατάσταση των σωζόμενων τμημάτων με τις υπάρχουσες μεθόδους συντήρησης (Benedict, 2015).



Εικόνα 37 Τα συμπληρωμένα γλυπτά έπειτα από την αποκατάσταση. Στην οθόνη μπορούμε να αντικρίσουμε την τρισδιάστατη αναπαράσταση την ανδρικής φιγούρας (Benedict, 2015).

Προκειμένου να ανακατασκευάσουν το ολοσχερώς κατεστραμμένο θραύσμα της προτομής της ανδρικής φιγούρας, χρησιμοποίησαν έναν τρισδιάστατο σαρωτή για να σαρώσουν το κεφάλι του γλυπτού. Στο τρισδιάστατο ψηφιακό αντίγραφο όρισαν έναν άξονα συμμετρίας και χρησιμοποίησαν κατοπτρισμό για να αντιστρέψουν το διατηρημένο τμήμα της χαμένης πλευράς, προκειμένου να εξαγάγουν το σχήμα της απώλειας. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή, εκτύπωσαν το κομμάτι που έλειπε σε πλαστικό. Για να στερεώσουν το τυπωμένο κομμάτι στο γλυπτό, τοποθέτησαν μαγνήτες σε αντίστοιχα σημεία τόσο στην πέτρα όσο και στην εκτύπωση. Αυτό καθιστά εύκολη την προσθήκη ή αφαίρεση του εκτυπωμένου αντικειμένου από το γλυπτό (Benedict, 2015) (Valentina Di Donato, 2017).



Εικόνα 38 Αριστερά παρατηρούμε τους τοποθετημένους μαγνήτες στην επιφάνεια του γλυπτού και δεξιά βλέπουμε το ολοκληρωμένο αποτέλεσμα με την προσθήκη του εκτυπωμένου πληρωτικού (Benedict, 2015).

2. Ψηφιοποίηση Αντικειμένων Πολιτισμικής Κληρονομιάς

Το ζήτημα της απόκτησης ακριβών τρισδιάστατων δεδομένων από αντικείμενα του πραγματικού κόσμου, ειδικά όταν είναι πιο περίπλοκα από απλά γεωμετρικά σχήματα, όπως σφαίρες ή κύβοι, είναι μια μεγάλη πρόκληση. Το πρόβλημα ήταν δύσκολο να λυθεί στο παρελθόν και οι προσεγγίσεις ήταν χρονοβόρες. Η πρόοδος στον τομέα των ηλεκτρονικών υπολογιστών είχε ως αποτέλεσμα μια συνεχώς εξελισσόμενη αγορά για τρισδιάστατους σαρωτές. Αυτά τα συστήματα επιτρέπουν την καταγραφή των γεωμετρικών και χρωματικών πληροφοριών που μεταφέρονται από τα αντικείμενα, εντός ενός ελάχιστου χρονικού πλαισίου. Οι αρχές που καθοδηγούν τη λειτουργία τους βασίζονται στα γεωμετρικά αξιώματα και συναρτήσεις που θα αναλυθούν λεπτομερέστερα στη συνέχεια.

Υπάρχουν διαφορετικά εμπορικά και ακαδημαϊκά συστήματα για να ανταποκρίνονται στην 3D απεικόνιση, το κάθε ένα με ξεχωριστή προοπτική και παραδοχές. Η παγκόσμια ερευνητική κοινότητα ενδιαφέρεται για την ανάλυση μεθόδων απεικόνισης και την εύρεση αλγορίθμων οι οποίοι επιτυγχάνουν αποτελεσματικότερη ανάλυση δεδομένων. Η όραση υπολογιστών (Computer Vision), τα τρισδιάστατα γραφικά, η μηχανολογία, οι μετρήσεις με ηλεκτρονικούς αισθητήρες, η φωτογραμμετρία και τα μαθηματικά είναι τα κυριότερα ερευνητικά πεδία των οποίων οι επιστήμονες έχουν συντελέσει για την ανάπτυξη των “3D scanners”.

Η αύξηση στη δημοτικότητα των “3D scanners” οφείλεται κυρίως στη μαζική ανάπτυξη των Η/Υ στον τομέα των 3D γραφικών σε πραγματικό χρόνο. Η ικανότητα χειρισμού σύνθετης γεωμετρίας 3D σε συσκευές χαμηλού κόστους είναι χρήσιμη για την υψηλή ευκρίνεια των μοντέλων 3D που δημιουργούνται από σαρωτές. Στόχος των ερευνών είναι η ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου χρόνου για τη σύλληψη των αντικειμένου, διατηρώντας παράλληλα υψηλή πιστότητα στα αποτελέσματα.

Κυριαρχούν ποικίλες απόψεις για το αν η τρισδιάστατη σάρωση πρέπει να θεωρείται μέρος γεωδαιτικών μελετών ή μελετών φωτογραμμετρίας και όρασης υπολογιστή. Αυτό οφείλεται στους ποικίλες τεχνικές που εφαρμόζονται για τον υπολογισμό των τρισδιάστατων συντεταγμένων της επιφάνειας ενός αντικειμένου. Η οπτική γωνία του χρήστη είναι το πιο σημαντικό, ανεξαρτήτως της εκάστοτε εφαρμοζόμενης τεχνικής.

Ως σαρωτής 3D μπορεί να οριστεί οποιαδήποτε συσκευή που είναι σε θέση να συλλέγει αυτόματα συντεταγμένες τριών διαστάσεων από ένα συγκεκριμένο σημείο της επιφάνειας ενός του επιλεγμένου αντικειμένου. Αυτή η μέθοδος είναι συνήθως υψηλής ταχύτητας, με εκατοντάδες ή και χιλιάδες σημεία δειγματοληψίας το δευτερόλεπτο. Αυτό επιτρέπει τη σάρωση σε πραγματικό χρόνο που μπορεί επίσης να διακρίνει μεταξύ διαφορετικών χρωμάτων και υφών. Ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιείται αυτή η συσκευή είναι να στερεωθεί σε μία καθορισμένη θέση με τη βοήθεια ενός κλασσικού τριπόδου φωτογράφισης ή κάποιας βάσης που δουλεύει με παρόμοιο τρόπο. Το σκανάρισμα του αντικειμένου αποτελεί συχνά το ευκολότερο κομμάτι της διαδικασίας ψηφιοποίησης. Η αναπαράσταση πιστών τρισδιάστατων ομοιωμάτων ανώμαλων επιφανειών είναι συχνά χρονοβόρα και απαιτητική διαδικασία ενώ η επεξεργασία των δεδομένων αυτών και η δημιουργία ενός πιστού μοντέλου (υψηλής ευκρίνειας) απαιτούν διαδικασίες ακόμη πιο χρονοβόρες.

Βασικές κατηγορίες τρισδιάστατων σαρωτών (3D scanners).

Υπάρχει μια ποικιλία από σαρωτές 3D που διατίθενται στην αγορά, καθένας με το δικό του μοναδικό σύνολο χαρακτηριστικών και δυνατοτήτων. Ενώ ορισμένοι σαρωτές μπορεί να είναι πιο κατάλληλοι για συγκεκριμένες εργασίες από άλλους, τελικά εξαρτάται από τις συγκεκριμένες ανάγκες του χρήστη. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι συσκευών σάρωσης, με βάση τη μέθοδο αλληλεπίδρασής τους με το αντικείμενο που σαρώνεται. Αυτή η κατηγοριοποίηση προτάθηκε από τον Brian Curless (Curless, 1999).

2.1. Τρισδιάστατοι Σαρωτές Επαφής.

Σαρωτές επαφής ονομάζονται συσκευές που διαθέτουν μηχανικούς βραχίονες οι οποίοι έρχονται σε επαφή με το αντικείμενο και με τη βοήθεια ηλεκτρονικών αισθητήρων θέσης καταγράφουν την θέση των αξόνων στήριξης x, y, z του βραχίονα σε ένα καρτεσιανό επίπεδο. Το νέφος σημείων που χρειάζεται η διαδικασία ψηφιοποίησης ενός αντικείμενου υπολογίζεται από τα σημεία επαφής, λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική απόσταση και τη γωνία μεταξύ τους. Η μέθοδος αυτή έχει υψηλό βαθμό ακρίβειας και εφαρμόζεται ευρέως στον βιομηχανικό τομέα. Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα αυτού του τύπου σαρωτή είναι ότι το αντικείμενο που εξετάζεται πρέπει να έχει φυσική αλληλεπίδραση, κάτι που θα μπορούσε ενδεχομένως να βλάψει ή να αλλάξει το δείγμα. Μια τυπική συσκευή σάρωσης επαφών απεικονίζεται στις παρακάτω εικόνες (Συμεωνίδης, 2007).



Εικόνα 39 Φορητός σαρωτής ακριβείας τριών διαστάσεων. (Συμεωνίδης, 2007)



Εικόνα 40 Σαρωτής ακριβείας τριών διαστάσεων τύπου γέφυρας. (Συμεωνίδης, 2007)

Παρόλο που αυτή η κατηγορία σαρωτών παρουσιάζει αποτελέσματα υπερύψηλης ακριβείας, δεν παύει να αποτελεί μια καταστροφική μέθοδο σάρωσης καθώς υπάρχει επαφή με το κάθε δείγμα. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας θα εστιάσουμε στις μη καταστροφικές μεθόδους ψηφιοποίησης αντικειμένων πολιτισμικής Κληρονομιάς και επομένως θα επικεντρωθούμε περαιτέρω στην ανάλυση των τεχνολογιών του ακόλουθου τύπου σαρωτών.

2.2. Ανέπαφοι Τρισδιάστατοι Σαρωτές.

Οι ανέπαφοι σαρωτές ή αλλιώς σαρωτές απόστασης, λειτουργούν εκπέμποντας ένα μήκος κύματος φωτός και ανιχνεύοντας την ανάκλασή του από το δείγμα. Με τον τρόπο αυτό έχουν τη δυνατότητα να υπολογίσουν τις διαστάσεις και τη γεωμετρία του δείγματος. Αυτές οι συσκευές εκπέμπουν παλμό φωτός χρησιμοποιώντας λέιζερ. Η συσκευή υπολογίζει το χρόνο που θα χρειαζόταν για να επιστρέψει ένας παλμός φωτός στην πηγή του αφού ανακλαστεί από το δείγμα. Ο χρόνος που χρειάζεται ένας παλμός φωτός για να διανύσει μια δεδομένη απόσταση είναι ίσος με την απόσταση διαιρούμενη με την ταχύτητα του φωτός. Επομένως, το ήμισυ της συνολικής απόστασης που διανύει ένας παλμός φωτός είναι η απόσταση από το σημείο εκπομπής μέχρι το σημείο όπου προσκρούει σε ένα αντικείμενο. Μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα τρισδιάστατο μοντέλο του δείγματος συλλέγοντας μια σειρά εκπομπών σε μια ευρεία περιοχή. Οι κατασκευαστικές εταιρείες προτιμούν συνήθως τέτοιες συσκευές επειδή μπορούν να σαρώσουν ένα ολόκληρο κτίριο σε αρκετά μικρό χρονικό διάστημα. Ένα από τα κύρια μειονεκτήματα της χρήσης αυτής της τεχνολογίας είναι ότι απαιτεί περισσότερο χρόνο για τη λήψη εικόνων υψηλής ανάλυσης. Επιπλέον, μικροπαραμορφώσεις παρατηρούνται συχνά στις τελικές εικόνες κατά τη σάρωση αντικειμένων με

ακανόνιστη γεωμετρία (Συμεωνίδης, 2007). Ένας από τους πιο δημοφιλείς σαρωτές στην κατηγορία του είναι ο σαρωτής που φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 41 Ανέπαφος σαρωτής τριών διαστάσεων. [\(πηγή\)](#)

2.2.1. Σαρωτές τριγωνισμού με ακτίνες λέιζερ (triangulation)

Οι γεωμετρικές ιδιότητες των τριγώνων είναι το θεμέλιο για αρκετές μεθόδους μέτρησης. Η χρήση τριγώνων είναι θεμελιώδης για την τοπογραφία, τόσο στην αρχαία Ελλάδα όσο και σήμερα. Οι σύγχρονοι επιθεωρητές χρησιμοποιούν τρισδιάστατους σαρωτές λέιζερ για να κάνουν ακριβείς μετρήσεις, αλλά η βασική αρχή της χρήσης τριγώνων για τη χαρτογράφηση μιας περιοχής παραμένει η ίδια. Ο νόμος των συνημιτόνων είναι ένα βασικό γεωμετρικό θεώρημα που μας επιτρέπει να λύσουμε άμεσα το πρόβλημα του τριγωνισμού. Τα χαρακτηριστικά της ακτινοβολίας που εκπέμπουν οι πηγές δέσμης λέιζερ τις κάνουν ιδιαίτερα χρήσιμες για την σάρωση τριών διαστάσεων. Τα κύρια από αυτά είναι:

- μικρή απόκλιση
- υψηλή πυκνότητα ισχύος
- εκπομπή σε ένα μόνο μήκος κύματος.

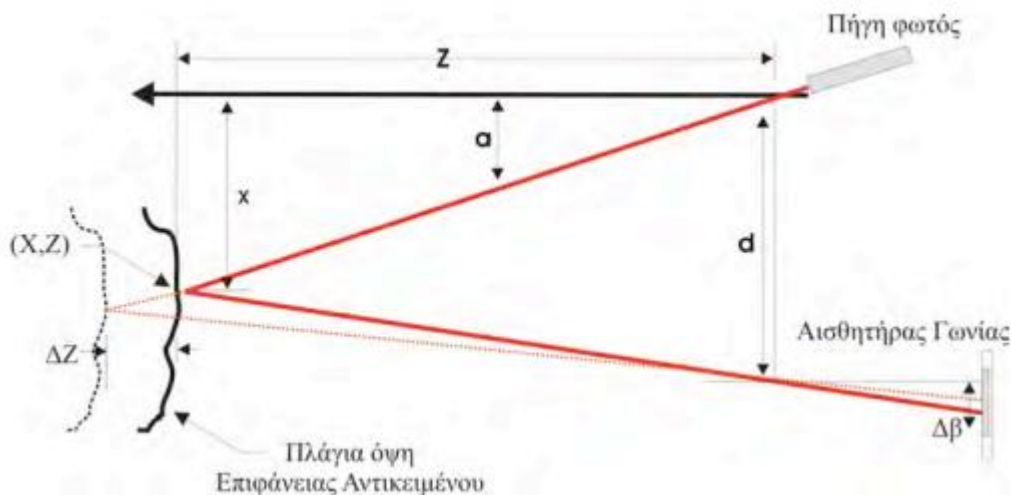
Οι ακτίνες λέιζερ αποτελούν ιδανική τεχνική σάρωσης χωρίς επαφή λόγω των ιδιοτήτων τους. (Curless & M., 1995).

Οι ακτίνες λέιζερ των σαρωτών αυτών έχουν συνήθως εφαρμογή σε αποστάσεις <10μ και ταξινομούνται ανάλογα με τον αριθμό των οπτικών αισθητηρίων που έχουν. Σε σαρωτές που υπάρχει αισθητήριο εικόνας, βρίσκεται μια πηγή η οποία προβάλλει τη δέσμη λέιζερ με συγκεκριμένη γωνία πάνω στο αντικείμενο. Ανάλογα με τις ανάγκες της σάρωσης η γωνία της δέσμης είναι δυνατό να ποικίλλει. Ένα αισθητήριο εικόνας CCD ή CMOS υπάρχει στο άλλο άκρο της βάσεως του συστήματος

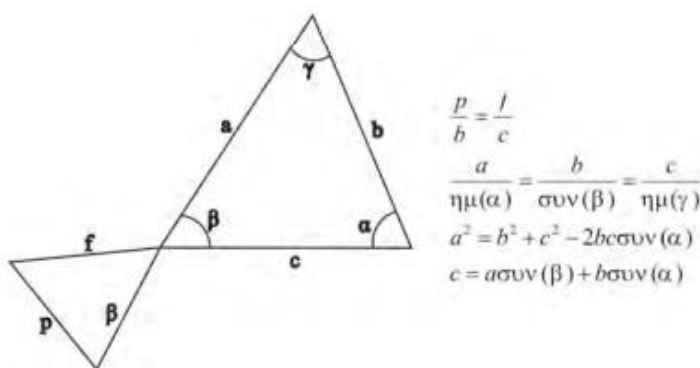
και είναι υπεύθυνος για την ανίχνευση της θέσης της δέσμης λέιζερ καθώς αντανακλάται από την επιφάνεια του αντικειμένου. Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι ηλεκτρονικών οπτικών αισθητήρων: CCD και CMOS. Οι αισθητήρες CCD είναι πιο ακριβοί αλλά προσφέρουν καλύτερη ποιότητα εικόνας, ενώ οι αισθητήρες CMOS είναι λιγότερο ακριβοί αλλά έχουν χαμηλότερη ποιότητα εικόνας. Είναι ηλεκτρονικά κυκλώματα μεγάλης κλίμακας που είναι ενσωματωμένα με χιλιάδες ή εκατομμύρια ριχέλ ανά μονάδα επιφάνειας. Αυτά τα κυκλώματα κάνουν μετατροπή της φωτεινής ενέργειας σε ηλεκτρονικά σήματα. Η προβολή ακτίνων μπορεί απλά να σχηματίσει ένα φωτεινό σημείο, μια γραμμή, ένα ριγέ μοτίβο ή ακόμα και ένα στατικό τυχαίο πλέγμα. Η θέση της ανακλώσας επιφάνειας μπορεί να βρεθεί δημιουργώντας ένα φανταστικό τρίγωνο. Η ακρίβεια των μετρήσεων βάθους μειώνεται όσο αυξάνεται η απόσταση μεταξύ του σαρωτή και του αντικειμένου. Για πρακτικούς λόγους, η απόσταση μεταξύ των οπτικών αισθητήρων και της πηγής δέσμης λέιζερ δεν είναι δυνατό να αλλάξει ανάλογα. (Curless & M., 1995).

Μια παραλλαγή της ιδέας του τριγωνισμού αποτελεί η χρήση δυο οπτικών αισθητηρίων τα οποία υπάρχουν και στις δυο άκρες της βάσεως του σαρωτή και ανιχνεύουν το σημείο ανάκλασης της δέσμης λέιζερ. Αυτό επιτρέπει πιο ακριβείς μετρήσεις της απόστασης μεταξύ των αισθητήρων και του σημείου ανάκλασης. Η γεωμετρική λύση δεν διαφέρει από εκείνη με ένα αισθητήριο, επομένως τα αποτελέσματα είναι εξίσου ακριβή. Ο δεύτερος αισθητήρας προσφέρει για ταχύτερη σάρωση, καθώς εκείνος φτάνει σε σημεία που ο πρώτος αισθητήρας ίσως να μην φτάνει εξαιτίας γωνίας και θέσης που διαφέρει του πρώτου. Στην τεχνική οπτικού τριγωνισμού χρησιμοποιείται το φως για τη μέτρηση αποστάσεων. Έχει χρησιμοποιηθεί για περισσότερα από είκοσι χρόνια. Η επίτευξη σταθερότερων αισθητηρίων και διόδων φωτός και έχει βελτιώσει πολύ την τεχνική αυτή στις μέρες μας. Οι τύποι σαρωτών τριγωνισμού διακρίνονται κυρίως από τη δομή του φωτισμού, όπως ένα σημείο, μια δέσμη λέιζερ ή ένα πλέγμα. Ο τύπος των αισθητήρων (συστοιχία, πλέγμα, CCD, CMOS) και η μέθοδος σάρωσης (μετακίνηση αντικειμένου γύρω από την πηγή φωτός είτε μετακίνηση του συστήματος γύρω από το αντικείμενο) επηρεάζουν την τελική εικόνα (Curless & M., 1995).

Η αρχή των συστημάτων τριγωνοποίησης είναι ότι βασίζονται σε τρία σημεία για τον υπολογισμό μιας θέσης. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 42. Όπως παρατηρούμε κάνοντας χρήση του νόμου των συνημιτόνων (Εικόνα 43) οι σαρωτές έχουν τη δυνατότητα να καταλάβουν και να μετρήσουν το διάστημα μεταξύ της επιφάνειας του αντικείμενου και του αισθητήρα γωνίας. Οι δύο γωνίες ενός τριγώνου είναι πάντα αλληλένδετες με τη βάση του τριγώνου. Γνωρίζοντας αυτές τις δύο γωνίες, μπορούν να προσδιοριστούν όλες οι διαστάσεις και τα χαρακτηριστικά του τριγώνου. Με οποιαδήποτε μεταβολή του διαστήματος (ΔZ), η γωνία ($\Delta \beta$) είναι δυνατόν να υπολογισθεί χρησιμοποιώντας το θεώρημα των αντίθετων γωνιών, υποθέτοντας ότι το α είναι πάντα σταθερό. Ο αισθητήρας γωνίας είναι σταθερός. Για να υπολογίσετε τη θέση της επιφάνειας ενός αντικείμενου, πρέπει να σαρώσετε κάθε δισδιάστατη εικόνα που λαμβάνεται από έναν οπτικό αισθητήρα για να βρείτε το σημείο μέγιστης συγκέντρωσης φωτός. Η διάταξη ενός συστήματος δέσμης λέιζερ στο οποίο χρησιμοποιείται ένα μόνο σημείο είναι γνωστή ως σύστημα δέσμης λέιζερ ενός σημείου (Curless & M., 1995).



Εικόνα 42 Αναπαράσταση της λειτουργίας ενός σαρωτή με σύστημα μονού σημείου (Παυλίδης, et al., 2014).



$$\frac{p}{b} = \frac{f}{c}$$

$$\frac{a}{\eta\mu(\alpha)} = \frac{b}{\sigma\upsilon\nu(\beta)} = \frac{c}{\eta\mu(\gamma)}$$

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc\sigma\upsilon\nu(\alpha)$$

$$c = a\sigma\upsilon\nu(\beta) + b\sigma\upsilon\nu(\alpha)$$

Εικόνα 43 Νόμος των συνημιτόνων (πηγή).

Οι πληροφορίες υψής είναι σημαντικές σε εφαρμογές ψηφιοποίησης αντικειμένων πολιτισμικής κληρονομιάς επειδή παρέχουν ρεαλισμό, ειδικά για αντικείμενα που έχουν κάποια μορφή διακόσμησης. Οι πληροφορίες υψής χαρτογραφούνται στη γεωμετρία για να δημιουργηθεί μια φωτορεαλιστική απόδοση του αντικειμένου. Ορισμένοι σαρωτές είναι εξοπλισμένοι με αισθητήρες που μπορούν να ανιχνεύσουν την ισχύ του ανακλώμενου φωτός. Αυτές οι πληροφορίες, ωστόσο, δεν επαρκούν για ακριβής αποτύπωση της υψής. Ο μεγαλύτερος αριθμός των εμπορικών σαρωτών τριγωνισμού είναι βελτιστοποιημένοι σαρωτές που αναγνωρίζουν τη δέσμη λέιζερ και το σημείο στο οποίο δείχνει, αντί για την καταγραφή των πληροφοριών υψής σε αυτό. Από ορισμένους χρήστες απαιτείται μια κάμερα υψηλότερης ποιότητας στο σύστημα σάρωσης για να παράγουν εικόνες υψηλής ποιότητας. Ωστόσο, αυτή η λύση είναι ακριβή και κάποιοι χρήστες ενδέχεται να μην είναι σε θέση ή να μην επιθυμούν να ανταποκριθούν στο κόστος αυτής της πρόσθετης λειτουργίας. Πολλές εταιρείες έχουν διαπιστώσει ότι μια απλή λύση σε αυτό το πρόβλημα είναι η τοποθέτηση μιας εξωτερικής ψηφιακής κάμερας στην κορυφή του σαρωτή, χρησιμοποιώντας ένα σύστημα υποστήριξης και ρύθμισης. Είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τη σχετική απόσταση μεταξύ του σαρωτή και της ψηφιακής κάμερας προκειμένου να τα βαθμονομήσουμε αποτελεσματικά καθώς αυτό θα μας επιτρέψει να χαρτογραφήσουμε διαστάσεις εικόνες πάνω σε ένα πολυγωνικό πλέγμα ή ένα νέφος σημείων (Curless & M., 1995).

Βαθμονόμηση του οπτικού μέσου του τρισδιάστατου σαρωτή.

Η βαθμονόμηση του ψηφιακού οπτικού συστήματος που χρησιμοποιείται από έναν σαρωτή λέιζερ μικρής εμβέλειας είναι απαραίτητη για τη σωστή λειτουργία του. Στη διαδικασία βαθμονόμησης γενικά προσδιορίζονται τα εσωτερικά και εξωτερικά χαρακτηριστικά ενός οπτικού συστήματος χρησιμοποιώντας ένα πραγματικό αντικείμενο του οποίου τα γεωμετρικά μεγέθη είναι αποτυπωμένα λεπτομερώς. Τα προαναφερθέντα μεγέθη συντελούν στον εντοπισμό του μαθηματικού μοντέλου που αντιπροσωπεύει την απόσταση εστίασης, την παραμόρφωση που προκαλούνται από τον φακό στην εικόνα και άλλες σχετικές παραμέτρους. Σαρώνοντας ένα γνωστό αντικείμενο γίνεται δυνατός ο υπολογισμός της ακρίβειας και των ανοχών μέτρησης του συστήματος. Αυτή η διαδικασία επίσης την επαληθεύει και την επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα. Η ακρίβεια του συστήματος είναι δυνατό να υπολογισθεί συλλαμβάνοντας ένα γνωστό αντικείμενο βαθμονόμησης τοποθετώντας τον σαρωτή σε διαφορετική θέση και προσανατολισμό κάθε φορά. Σύμφωνα με τον Curless είναι απαραίτητο να υπάρχει γνώση των χαρακτηριστικών του εργαλείου που χρησιμοποιούμε για τη βαθμονόμηση του σαρωτή με ακρίβεια δεκαπλάσια της ακρίβειας του ψηφιακού οπτικού συστήματος του σαρωτή (Curless & M., 1995).

Εξασφάλιση μέγιστης ανάλυσης στην αποτύπωση του σαρωτή.

Θεωρητικά, η τελική ανάλυση ενός αντικειμένου είναι συνάρτηση του μεγέθους της γωνιακής αλλαγής που μπορεί να αντιληφθεί το σύστημα καθώς η δέσμη λέιζερ κινείται στην επιφάνεια. Μια πιο πρακτική εξήγηση της ανάλυσης σχετίζεται με το μέγεθος κηλίδας της ανακλώμενης δέσμης λέιζερ. Εάν η υψηλή ανάλυση είναι βασική απαίτηση σε μια εφαρμογή ψηφιοποίησης, τότε είναι σημαντικό να εκλεχτεί προσεκτικά η ικανότητα εστίασης της δέσμης στο αντικείμενο, έτσι ώστε το αντικείμενο να μπορεί να αποτυπωθεί στην υψηλότερη δυνατή ανάλυση. Η εικόνα 44 δείχνει ένα στιγμιότυπο της διαδικασίας ψηφιοποίησης του πάνω μέρους της προτομής. Η εστίαση ρυθμίζεται χειροκίνητα (εικόνα 45). Υπάρχει μια αξιοσημείωτη διαφορά στην ένταση της δέσμης καθώς ο σαρωτής πλησιάζει το σημείο βέλτιστης εστίασης (FARIN, 1993).

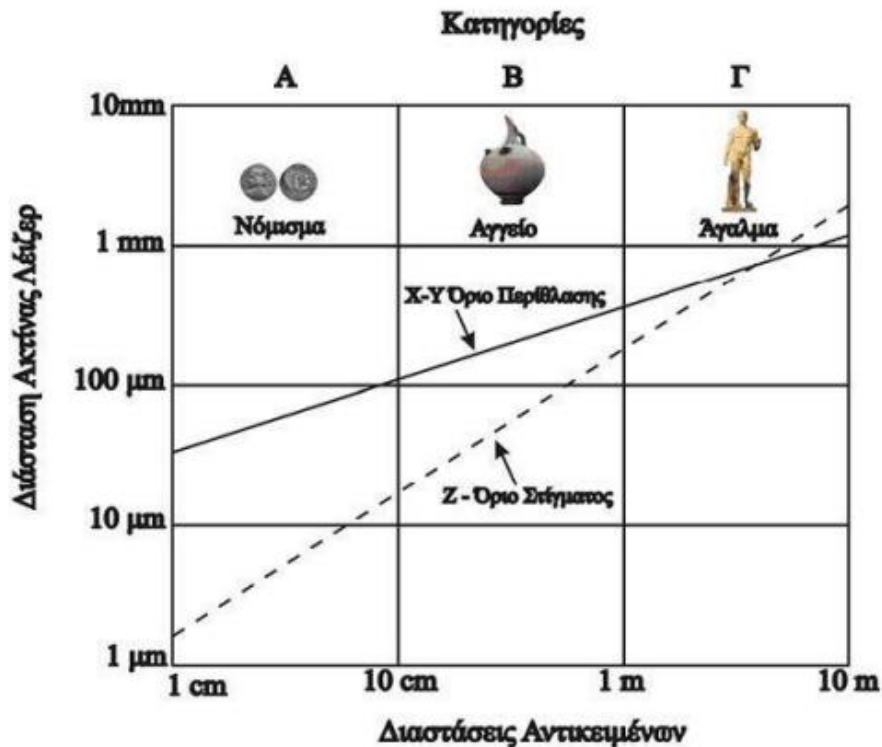


Εικόνα 44 Παράδειγμα ακτίνας λέιζερ εκτός εστίασης λόγω της λανθασμένης απόστασης από το αντικείμενο (FARIN, 1993).



Εικόνα 45 Σωστή ρύθμιση της εστίασης της δέσμης λέιζερ στο αντικείμενο επιτυγχάνοντας την μέγιστη ανάλυση (FARIN, 1993).

Η ανάλυση του οπτικού τριγωνισμού περιορίζεται από την περίθλαση της δέσμης φωτός. Ακόμη και με τη βέλτιστη ακτινοβολία, η ακτίνα δεν διατηρεί τέλεια ευθυγράμμιση με τον στόχο. Όσο μικρότερη είναι η δέσμη λέιζερ, τόσο περισσότερο περιθλά. Η περίθλαση της δέσμης περιορίζει την ισχύ που μπορεί να έχει η δέσμη λέιζερ. Ο βαθμός διάθλασης της ακτίνας αναπαρίσταται στο γράφημα στο γράφημα 46, με το μέγεθος των αντικειμένων να αλλάζει κατά μήκος του άξονα x . Τα αντικείμενα ταξινομήθηκαν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με τις διαστάσεις τους. Αυτός ο περιορισμός οφείλεται στην αδυναμία των αισθητήρων να παρακολουθούν με ακρίβεια τη δέσμη καθώς κινείται κατά μήκος των αξόνων x και y . Θα περίμενε κανείς μια συνεχή βελτίωση στην απόδοση του άξονα z καθώς η ισχύς της δέσμης αυξάνεται και πλησιάζει την επιφάνεια του αντικειμένου. Αυτή δεν είναι η ιδανική κατάσταση. Η εργασία του Beraldin παρέχει μια λεπτομερή ανάλυση των χαρακτηριστικών της διάδοσης της δέσμης φωτός (Beraldin, 2004).

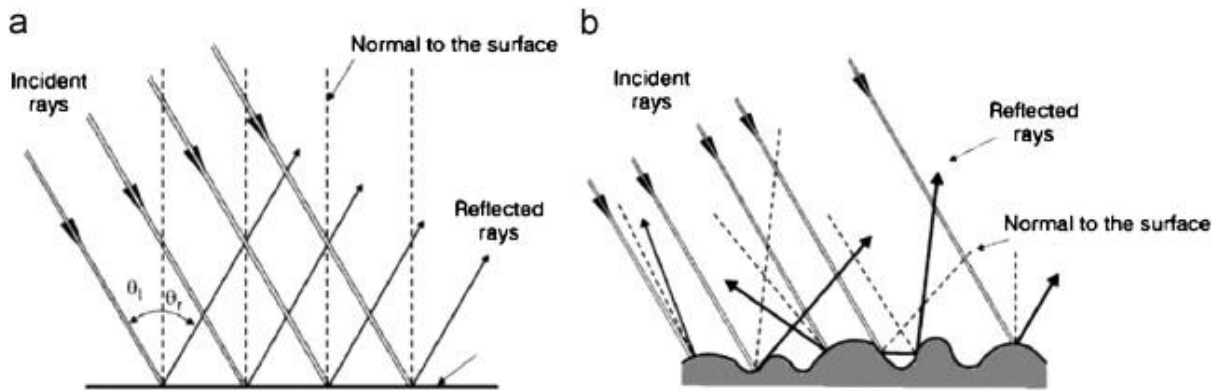


Εικόνα 46 Μετρό της διάθλασης της δέσμης λέιζερ ανά τον όγκο του αντικειμένου που θα σαρωθεί (Beraldin, 2004).

Θόρυβος της δέσμης λέιζερ.

Η ακρίβεια των δεδομένων από συστήματα τριγωνοποίησης μικρής εμβέλειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ορθή αντίληψη της θέσης της δέσμης λέιζερ. Ο τρόπος με τον οποίο το φως κατανέμεται σε ένα σημείο μπορεί να οδηγήσει σε προβλήματα με τους οπτικούς αισθητήρες που μπορούν να πάρουν τη δέσμη. Γνωστό και ως speckle effect, αυτό το φαινόμενο εμφανίζεται με τη μορφή τυχαίας διασποράς της δέσμης. Η επιφάνεια του αντικειμένου και η τραχύτητα αυτής της επιφάνειας ευθύνονται για τον θόρυβο. Ο θόρυβος που υπάρχει στη δέσμη φωτός μεταφέρεται επίσης στα τελικά δεδομένα (J.Vass, et al., 2008).

Έχουν γίνει αρκετές έρευνες στις επιπτώσεις του θορύβου στην ακρίβεια του προσδιορισμού της απόστασης με τριγωνισμό και έχουν καταλήξει στο συμπέρασμα ότι υπάρχει ένα θεμελιώδες όριο στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Η μείωση του θορύβου μπορεί να επιτευχθεί με τη χρήση συγκεκριμένων τεχνικών. Οι τεχνικές ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας που βασίζονται στο γραμμικό φιλτράρισμα δεν είναι αποτελεσματικές στη μείωση αυτού του τύπου θορύβου. Η διόρθωση μπορεί να επιτευχθεί μέσω διαφόρων τεχνικών φιλτραρίσματος στον τομέα της εικόνας. Αυτά τα φίλτρα είναι επίσης γνωστά ως χωρικά φίλτρα στον χώρο επεξεργασίας ψηφιακής εικόνας. Μια κλασική μέθοδος για την ελαχιστοποίηση του προβλήματος της λανθασμένης ερμηνείας της θέσης είναι η εύρεση του κέντρου του μονοδιάστατου παλμού της δέσμης. Τα αποτελέσματα αυτής της τεχνικής είναι ακριβή μόνο όταν η επιφάνεια σάρωσης είναι επίπεδη. Οι οπτικές ιδιότητες της επιφάνειας ενός αντικειμένου μπορούν να επηρεάσουν την καλή απόδοση ενός σαρωτή λέιζερ (J.Vass, et al., 2008).



Εικόνα 47 Στο σχήμα a παρατηρούμε την ανάκλαση της δέσμης λέιζερ σε λεία επιφάνεια. Στο σχήμα b παρατηρούμε την ανάκλαση της δέσμης λέιζερ σε τραχύ επιφάνεια, φαινόμενο που προκαλεί θόρυβο στις μετρήσεις του σαρωτή (J.Vass, et al., 2008).

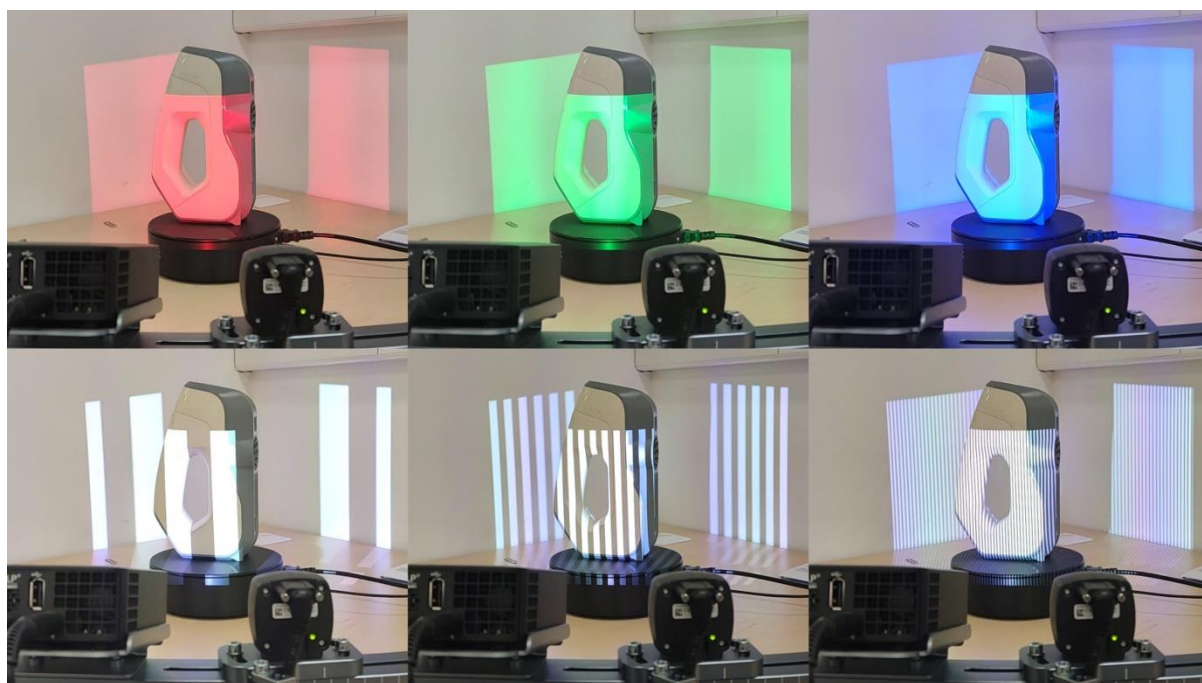
Ο καλύτερος τύπος επιφάνειας για ψηφιοποίηση με την χρήση ακτινών λέιζερ είναι αυτός που είναι ματ και έχει υψηλό δείκτη ανάκλασης. Η δύναμη του φωτός καθορίζει πόσο βαθιά διεισδύει στα υποστρώματα ενός αντικειμένου σε μια ημιδιαφανή επιφάνεια. Το φως διαχέεται επίσης μέσω των υποστρωμάτων του αντικειμένου, προκαλώντας σκέδαση. Στην επιφάνεια, το οπτικό σύστημα του σαρωτή συλλέγει ανακλάσεις φωτός που περιέχουν κορυφές. Εάν η ένταση της δέσμης μειωθεί, ο θόρυβος γίνεται πιο έντονος, ο οποίος με τη σειρά του μειώνει την ποιότητα της 3D ανακατασκευής. Ο θόρυβος εμφανίζεται στα δεδομένα όταν η ανακλαστικότητα της επιφάνειας ποικίλλει ή η γεωμετρία της επιφάνειας αποκλίνει έντονα από επίπεδο σε επίπεδο, με αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται η δέσμη φωτός. Η τραχύτητα της επιφάνειας προκαλεί επίσης θόρυβο στη δέσμη φωτός (J.Vass, et al., 2008).

Ο θόρυβος στη δέσμη φωτός είναι η κύρια πηγή σφάλματος και προκαλείται από ανακλάσεις της δέσμης από επιφάνειες που είναι τραχιές για το μήκος κύματος της δέσμης. Η τραχύτητα της επιφάνειας του αντικειμένου προκαλεί την απόκλιση της οπτικής διαδρομής από την αρχική της τροχιά. Αυτές οι αποκλίσεις προκαλούν τυχαία μοτίβα παραμόρφωσης στην τελική γεωμετρία. Η εικόνα που χρησιμοποιείται για τη λήψη του παλμού της δέσμης φωτός περιέχει θόρυβο, ο οποίος επηρεάζει την αναγνώριση του κέντρου της δέσμης και, ως εκ τούτου, την ικανότητα του σαρωτή να ανακτήσει την τρίτη διάσταση (βάθος). Αυτό μπορεί να προκαλέσει σφάλματα ακόμα και όταν η επιφάνεια είναι επίπεδη (J.Vass, et al., 2008).

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές πηγές θορύβου που επηρεάζουν τη χάραξη με λέιζερ. Οι πηγές θορύβου σε αυτό το σύστημα είναι ο ηλεκτρικός θόρυβος, ο θόρυβος κβαντοποίησης και ο θόρυβος σκέδασης δέσμης φωτός. Αντίστοιχα, υπάρχουν δύο κύριες πηγές θορύβου που σχετίζονται με τους αισθητήρες λήψης εικόνας. Σε περιπτώσεις όπου η ισχύς της δέσμης φωτός είναι χαμηλή, η αναλογία σήματος προς θόρυβο είναι μικρή, και έτσι, ο θόρυβος τόσο από τη δέσμη φωτός όσο και από το περιβάλλον επηρεάζει στο μέγιστο τα αποτελέσματα της απεικόνισης. Ο θόρυβος που δημιουργείται από τη σκέδαση δέσμης σχετίζεται άμεσα με τις ιδιότητες της δέσμης λέιζερ. Κατά τη χαρτογράφηση σύνθετων επιφανειών, τα σημειακά σύννεφα συνήθως περιέχουν θόρυβο. Ο θόρυβος εμφανίζεται στο σύννεφο με τη μορφή σημείων που, ενώ θα έπρεπε να βρίσκονται στο ίδιο φανταστικό επίπεδο, φαίνεται να κατανέμονται τυχαία γύρω από αυτό το επίπεδο. Αυτό το φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα δυσκολίες κατά την επεξεργασία δεδομένων, γεγονός που καθιστά αναγκαία τη χρήση φίλτρων εξομάλυνσης και απλοποίησης. Ο σκοπός των φίλτρων είναι να μειώσουν το θόρυβο και τα δεδομένα διατηρώντας παράλληλα τα περιθώρια και τον όγκο ενός αντικειμένου (J.Vass, et al., 2008).

2.2.2. Σαρωτές Δομημένου φωτός.

Αυτή η μέθοδος λειτουργεί χρησιμοποιώντας μια απλή αρχή. Οι πληροφορίες βάθους μπορούν να ανακτηθούν προβάλλοντας ένα μοτίβο φωτός σε ένα αντικείμενο από μια γνωστή γωνία. Το Shape-From-Structured-Light είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί τριγωνισμό για να προσδιορίσει το σχήμα ενός αντικειμένου. Αυτή η τεχνική είναι παρόμοια με τη σάρωση με ακτίνες λέιζερ μικρής εμβέλειας. Αυτές οι δύο μεθοδολογίες μοιράζονται παρόμοια χαρακτηριστικά, ενώ τα εμπορικά logistics συχνά ταυτίζονται μεταξύ τους. Μια εξαίρεση σε αυτό θα ήταν εάν η πηγή λέιζερ αντικατασταθεί από μια συσκευή προβολής εικόνας(προτζέκτορας). Για την τρισδιάστατη ανακατασκευή, οι προβολές γίνονται από φωτεινά μοτίβα που περιέχουν πολλαπλές λωρίδες, πλέγματα ή ακόμα και ελλείψεις. Μερικές φορές βρίσκουμε μοτίβα που έχουν χρωματική κωδικοποίηση (Εικόνα 48). Η χρωματική κωδικοποίηση μπορεί να βοηθήσει τον σαρωτή να αναγνωρίσει πιο εύκολα τις αλλαγές στο μοτίβο καθώς αυτό προβάλλεται στην επιφάνεια ενός αντικειμένου. Η κωδικοποίηση μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους. Υπάρχει μια τάση προς χρήση μεταβλητής φωτεινότητας χρώματος και μεταβλητής πυκνότητας σχημάτων στα μοτίβα. Ο κύριος στόχος της προβολής κωδικοποιημένων μοτίβων είναι ο εύκολος διαχωρισμός μεμονωμένων pixel. Το κωδικοποιημένο μοτίβο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη σύγκριση των θέσεων των pixel που καταγράφονται από τον σαρωτή με τα σημεία εκκίνησης του σχεδίου. Με τη σύγκριση υπολογίζονται όλες οι αποκλίσεις στα αντίστοιχα σημεία και η τρίτη διάσταση μπορεί να ανακτηθεί με αυτόν τον έμμεσο τρόπο (Παυλίδης, et al., 2014).



Εικόνα 48 Οι εικόνες αποτυπώνουν την διαδικασία σάρωσης ενός αντικειμένου με 3D scanner δομημένου φωτός. (Εικόνες από πείραμα που διεξάχθηκε στο εργαστήριο blue.lab.)

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, το σύστημα απόδοσης κωδικοποιημένων προτύπων χρησιμοποιεί ειδικά σχεδιασμένα πρότυπα. Η κωδικοποίηση είναι η διαδικασία εκχώρησης κωδικών λέξεων σε ομάδες pixel. Τα εικονοστοιχεία σε ένα μοτίβο είναι διατεταγμένα σε έναν δισδιάστατο πίνακα, με κάθε κελί να περιέχει μια λέξη-κλειδί. Οι λέξεις-κλειδιά είναι απλοί αριθμοί που αντιστοιχίζονται στο μοτίβο χρησιμοποιώντας αποχρώσεις του γκρι ή γεωμετρικές αναπαραστάσεις. Ο αριθμός των σημείων που θα κωδικοποιηθούν είναι ανάλογος με τον αριθμό των απαιτούμενων λέξεων-κλειδιών. Με άλλα λόγια, όσο περισσότερες λέξεις-κλειδιά χρειάζονται, τόσο περισσότερους βαθμούς θα πρέπει να κωδικοποιηθούν. Καθώς ο αριθμός των «κουκκίδων» αυξάνεται, η δυσκολία σύνδεσής τους με το μοτίβο αυξάνεται. Η κωδικοποίηση μπορεί να γίνει είτε στον άξονα x είτε στον άξονα y ενός σχεδίου ή και στους δύο άξονες ταυτόχρονα. Οι μεθοδολογίες κωδικοποίησης μπορούν μερικές φορές να χρησιμοποιηθούν για την τρισδιάστατη σάρωση ακόμη και αντικειμένων που κινούνται με χαμηλές ταχύτητες (Παυλίδης, et al., 2014).

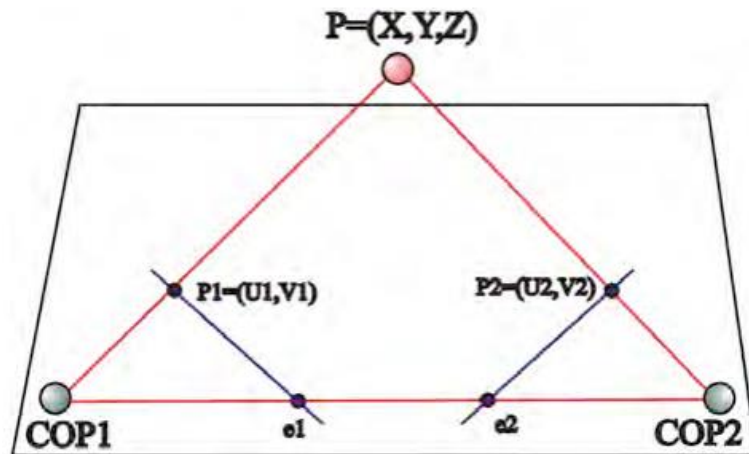
2.2.3. Σαρωτές στερεοσκοπικής φωτογράφισης (Στερεοφωτογράφιση)

Η μέθοδος της απόκτησης τρισδιάστατων μοντέλων από ζευγάρια φωτογραφιών υπάρχει εδώ και δεκαετίες. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται για τη δημιουργία τρισδιάστατων μοντέλων από δύο ή περισσότερες εικόνες της ίδιας σκηνής. Ο κύριος στόχος αυτής της μεθόδου είναι να εξάγει όσο το δυνατόν περισσότερες γεωμετρικές πληροφορίες από δύο φωτογραφίες με γνωστές θέσεις στο χώρο. Οι εξαγόμενες πληροφορίες χρησιμοποιούνται για την ανακατασκευή του τρισδιάστατου περιεχομένου των εικόνων. Η στερεοσκοπική φωτογραφία έχει σημαντικές εφαρμογές στον τομέα της όρασης υπολογιστή. Αυτή είναι μια προσπάθεια προσομοίωσης του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί το ανθρώπινο σύστημα όρασης. Αυτή η τεχνική βασίζεται στη χρήση δύο φωτογραφιών ενός αντικείμενου από διαφορετικές γωνίες, οι οποίες προσεγγίζουν τις εικόνες που θα έβλεπαν τα ανθρώπινα μάτια. Το αντικείμενο είναι μερικώς ορατό και στις δύο φωτογραφίες. Οι εσωτερικές και εξωτερικές παράμετροι των οπτικών συστημάτων χρησιμοποιούνται για τη βαθμονόμηση. Η βαθμονόμηση επιτρέπει να επαναφερθεί η τρίτη διάσταση των κοινών σημείων σε δύο φωτογραφίες. Η αναγνώριση κοινών σημείων στις εικόνες μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτόματα ή χειροκίνητα. Η διαδικασία ανάκτησης βάθους χρησιμοποιεί μαθηματικούς αλγόριθμους που λαμβάνουν παραμέτρους από τη βαθμονόμηση και τη διαφορά στη θέση των κοινών σημείων μεταξύ των δύο εικόνων (Παυλίδης, et al., 2014).

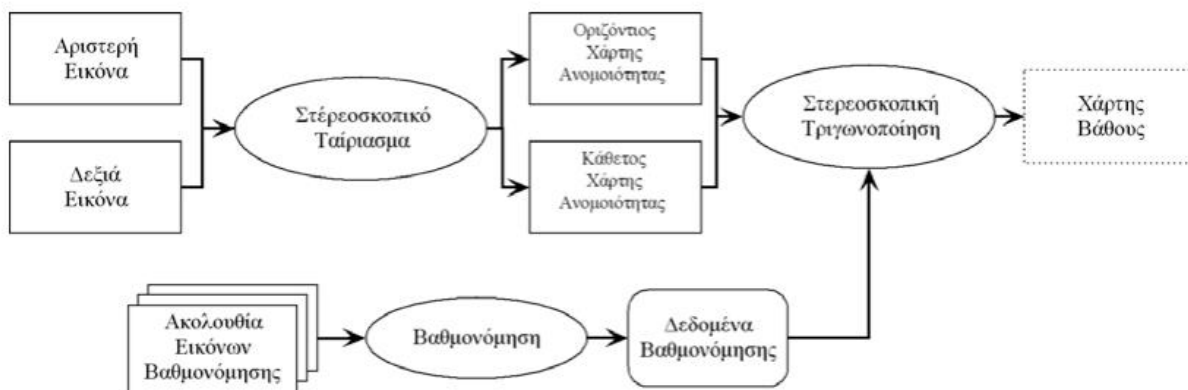
Οι μαθηματικές αρχές που διέπουν τη διαδικασία προέρχονται από το πεδίο της προβολικής γεωμετρίας. Στην προβολική γεωμετρία, τα σημεία θεωρούνται ισοδύναμα εάν βρίσκονται στην ίδια ευθεία. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 49, η λύση στο πρόβλημα είναι απλοποιημένη. Τρία σημεία COP1, COP2 και P σχηματίζουν ένα επιπολικό επίπεδο. Τα κέντρα προβολής των σημείων (COP1 και COP2) συνδέονται με μια νοητή γραμμή που τέμνει το επίπεδο στο οποίο είναι τοποθετημένη η φωτογραφία. Τα συζυγή σημεία τομής είναι τα e_1 και e_2 , τα οποία αναφέρονται ως επιπολικά. Το σημείο P μπορεί να υπολογιστεί βρίσκοντας το σημείο τομής των προβολών των P1 και P2 σε τρισδιάστατο χώρο (Παυλίδης, et al., 2014).

Το δύσκολο κομμάτι στη στερεοσκοπική ανάλυση είναι να καθοριστεί ποια pixel στις δύο εικόνες αντιστοιχούν στο ίδιο σημείο στο χώρο. Το πρόβλημα αντιστοίχισης είναι ένα πολύ γνωστό πρόβλημα στα μαθηματικά. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την

αντιστοίχιση των πληροφοριών στις εικόνες και την κατασκευή χαρτών ανομοιότητας. Αυτοί οι χάρτες μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της γεωμετρίας της επιφάνειας ενός αντικειμένου χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του τριγωνισμού. Το Σχήμα 50 παρέχει μια επισκόπηση των κύριων βημάτων που εμπλέκονται σε μια γενικευμένη διαδικασία αντιστοίχισης (Παυλίδης, et al., 2014).

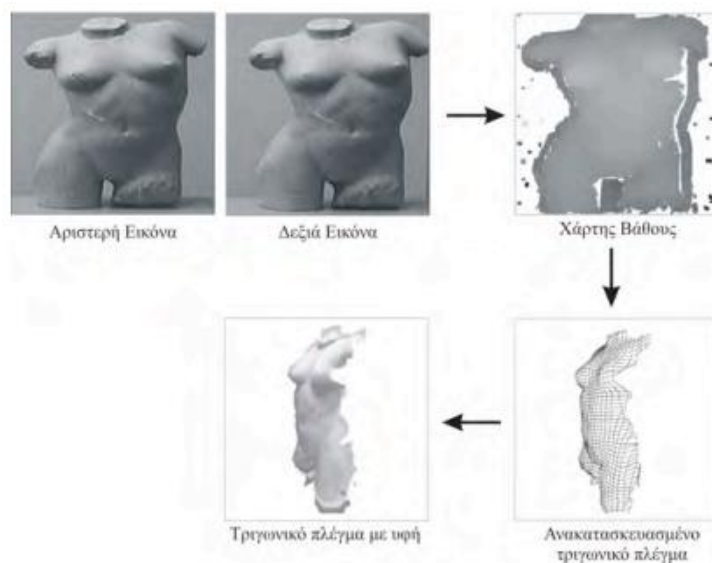


Εικόνα 49 Επιπολικό επίπεδο και στερεοσκοπική αντιστοίχιση (Παυλίδης, et al., 2014).



Εικόνα 50 Σχεδιάγραμμα της διαδικασίας δημιουργίας ενός χάρτη βάθους (Παυλίδης, et al., 2014).

Ως αποτέλεσμα λαμβάνουμε ένα χάρτη με τα βάθη της σκηνής (depth map). Οι τιμές των εικονοστοιχείων του χάρτη αντιπροσωπεύουν την απόσταση από την επιφάνεια του αντικειμένου μέχρι το κέντρο του φακού της ψηφιακής φωτογραφικής μηχανής. Το Σχήμα 51 περιγράφει τη διαδικασία για την ανακατασκευή ενός αγάλματος. Η αριστερή και η δεξιά εικόνα χρησιμοποιούνται ως πηγές πληροφοριών για την κατασκευή του χάρτη βάθους από τον οποίο προέρχεται το τριγωνικό πλέγμα (3D mesh) πάνω στο οποίο προβάλλονται οι πληροφορίες υφής.



Εικόνα 51 Βήματα επεξεργασίας και αποτύπωσης τρισδιάστατου αντικειμένου με την διαδικασία της στερεοφωτογράφισης (Παυλίδης, et al., 2014).

Το ενδιαφέρον σε αυτόν τον τομέα επεξεργασίας εικόνας είναι μεγάλο όσο αφορά την έρευνα, όπως αποδεικνύεται από τον αριθμό των αλγορίθμων που επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη αναγνώριση κοινών σημείων μεταξύ δύο φωτογραφιών. Ένας από τους πιο διαδεδομένους αλγόριθμους που αναγνωρίζει ζεύγος φωτογραφιών είναι η (feature-based stereo matching). Ο αλγόριθμος έχει σχεδιαστεί για να αναγνωρίζει όλα τα διακριτά χαρακτηριστικά του αντικειμένου που εμφανίζονται επίσης στις εικόνες, όπως γωνίες, πλευρές, ευθείες γραμμές ή καμπύλες. Η επιπολική γεωμετρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση των καλύτερων αντιστοιχιών μεταξύ των σημείων. Αυτή η τεχνική είναι ισχυρή στην εκτίμηση βάθους, αλλά η ανάκτηση βάθους εκτελείται μόνο για σημεία εικόνας που έχουν αναγνωριστεί ως κοινά (Guy Godin, et al., 2001).

Αντίθετα, υπάρχουν αλγόριθμοι που βασίζονται στην ιδέα της τμηματοποίησης της εικόνας. Αυτός ο διαχωρισμός επιτρέπει στον αλγόριθμο να ελέγχει μικρές γειτονιές pixel για αντιστοιχίες μεταξύ των δύο φωτογραφιών. Η βέλτιστη αντιστοίχιση τμημάτων βασίζεται σε επιπολική γεωμετρία και μετρήσεις σφάλματος, όπως το ριζικό μέσο τετραγωνικό σφάλμα και το σφάλμα απόλυτης διαφοράς. Ο αλγόριθμος τμηματοποίησης παράγει πολύ πυκνούς χάρτες βάθους. Το μέγεθος των τμημάτων στα οποία χωρίζεται μια εικόνα επηρεάζει την ποιότητα της ανακατασκευής και τον απαιτούμενο χρόνο επεξεργασίας (Guy Godin, et al., 2001).

Υπάρχουν δύο πλεονεκτήματα της τεχνικής της τμηματοποίησης: πρώτον, ανήκει στην κατηγορία των τεχνικών παθητικής τρισδιάστατης εκτύπωσης και δεύτερον, βασίζεται σε φθινό εξοπλισμό που μπορεί να περιοριστεί μόνο σε δύο ψηφιακές φωτογραφικές μηχανές. Ωστόσο, υπάρχουν επίσης αρκετά σημαντικά μειονεκτήματα στην τεχνική, συμπεριλαμβανομένου του γεγονότος ότι το βάθος υπολογίζεται μόνο σε σημεία που περιέχουν αναγνωρίσιμα χαρακτηριστικά και οι χάρτες βάθους συχνά περιέχουν θόρυβο επειδή η αντιστοίχιση των φωτογραφιών είναι πολύ δύσκολη. Τα αποτελέσματα της μεθόδου δεν είναι ενθαρρυντικά όταν πρόκειται για πιθανές σιλουέτες που εμφανίζουν τα αντικείμενα. Επιπλέον, παρατηρείται δυσκολία αποτύπωσης σε επιφάνειες όπου η επιφάνεια δεν είναι λεία (Guy Godin, et al., 2001).

Οι πληροφορίες βάθους που εξάγονται από τα ζεύγη φωτογραφιών φέρουν την ένδειξη 2½D (2,5 διαστάσεων) αντί για 3D επειδή το αντικείμενο απεικονίζεται τρισδιάστατα σε σχέση με το επίπεδο αναφοράς, το οποίο είναι σχεδόν κάθετο στους δύο οπτικούς άξονες των εικόνων. Μια πλήρης τρισδιάστατη απεικόνιση ενός αντικειμένου απαιτεί μεγάλο αριθμό ζευγών φωτογραφιών (Guy Godin, et al., 2001).

2.2.4. Σαρωτές με τεχνική φωτοσκίασης.

Η σκίαση ενός αντικειμένου είναι πολύ σημαντική για τον προσδιορισμό της αντίληψης του βάθους αυτού του αντικειμένου. Πολλοί ερευνητές προσπάθησαν να αναπαράγουν τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί το ανθρώπινο σύστημα όρασης για να ανακτήσει το βάθος μέσω της χρήσης σκιών. Η μέθοδος ανάκτησης βάθους ShapeFrom-PhotoShading απαιτεί μόνο μία γωνία λήψης. Απαιτούνται περισσότερες μετρήσεις για την ακριβή σύλληψη του αντικειμένου. Αυτή η τεχνική χωρίζεται σε τέσσερις κατηγορίες: τεχνικές ελαχιστοποίησης, τεχνικές μετάδοσης, τεχνικές περιοχής και γραμμικές τεχνικές. Αυτή η διαίρεση βασίζεται στους διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους κάθε προσέγγιση εννοεί τη βασική ιδέα (Zhang, et al., 1999).

Οι μέθοδοι ελαχιστοποίησης λύνουν το πρόβλημα βρίσκοντας την ελάχιστη τιμή μιας ενεργειακής συνάρτησης, ενώ οι μέθοδοι μετάδοσης μελετούν πώς μεταδίδονται πληροφορίες σχήματος από ένα σύνολο σημείων που βρίσκονται στην επιφάνεια του αντικειμένου. Οι μέθοδοι υπολογισμού του βάθους που βασίζονται στην περιοχή βασίζονται σε υποθέσεις σχετικά με τον τύπο της επιφάνειας που εξετάζεται. Οι γραμμικές μέθοδοι για την επίλυση προβλημάτων βασίζονται σε μαθηματικούς χάρτες αντανάκλασης. Οι περισσότερες τεχνικές υποθέτουν ότι η πηγή φωτός ακολουθεί μια γνωστή, συγκεκριμένη διαδρομή και δημιουργεί πολύ συγκεκριμένες αντανάκλασεις. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά αυτών των αλγορίθμων είναι ότι δεν είναι σε θέση να επεξεργάζονται με ακρίβεια πληροφορίες από σκιασμένες περιοχές, καθώς δεν παρέχονται αρκετές πληροφορίες για την ένταση του χρώματος. Μέσα από μια εκτενή μελέτη που διεξήχθη από τους Ruo Zhang και άλλους διαπιστώθηκε πως για όλες οι τεχνικές φωτοσκίασης όταν δίνονται τεχνητά δεδομένα, οι αλγόριθμοι παράγουν γενικά μη ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα είναι ακόμη χειρότερα όταν εφαρμόζονται σε πραγματικές εικόνες. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης δεν προβλέπουν απαραίτητα πώς θα αποδώσει αυτή η τεχνική σε πραγματικά δεδομένα (Zhang, et al., 1999).

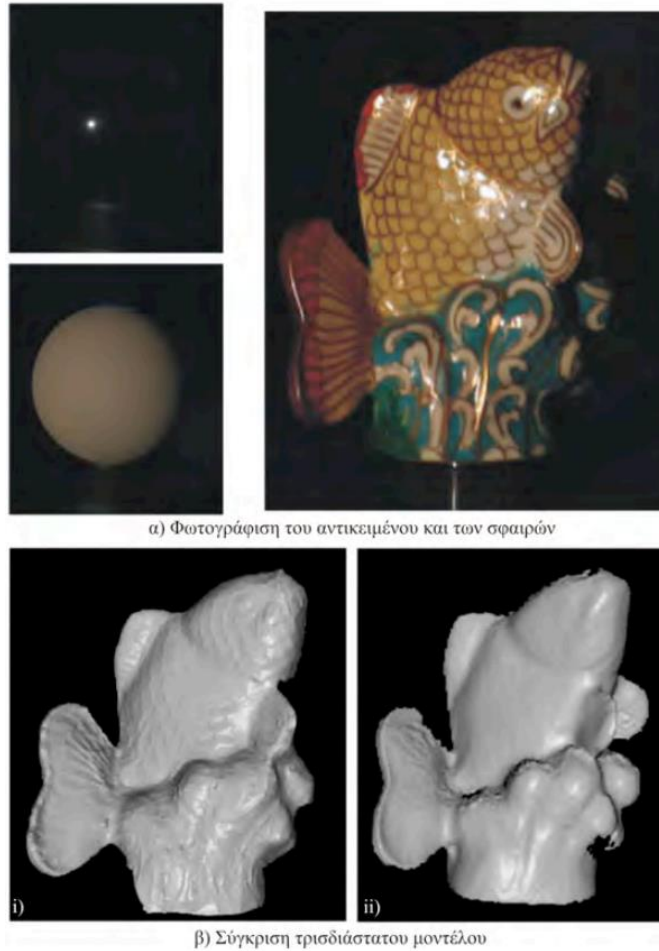
Υπάρχουν αρκετοί τομείς που θα μπορούσε να διερευνηθεί μελλοντική έρευνα προκειμένου να βελτιωθεί αυτή η τεχνική. Αν και τα μαθηματικά μοντέλα ανάκλασης φωτός που χρησιμοποιούνται είναι απλοϊκά, είναι νέα και έχουν ήδη προταθεί πιο περίπλοκα. Συνηθισμένο φαινόμενο είναι ο συνδυασμός δύο διαφορετικών τεχνικών προκειμένου να επιτευχθεί η αντιστοίχιση των πλεονεκτημάτων τους που θα οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα. Οι συγγραφείς της μελέτης προτείνουν ότι ο συνδυασμός της τεχνικής Shape-From-Photoshading με τη μέθοδο Shape-From-Stereophotography θα μπορούσε ενδεχομένως να αποφέρει πιο ακριβή αποτελέσματα. Έχει προταθεί ότι ο συνδυασμός της τεχνικής Shape-From-Shadow με μια άλλη τεχνική θα μπορούσε να παράγει καλύτερα αποτελέσματα, ιδιαίτερα για μέρη ενός αντικειμένου που βρίσκονται σε σκιά (Zhang, et al., 1999).

2.2.5. Σαρωτές φωτομετρικής στερεοσκοπικής φωτογράφισης.

Η τεχνική Figure-From-Photometric-Stereophotography(τεχνική φωτομετρικής στερεοσκοπικής φωτογράφισης) βασίζεται σε μια παραλλαγή της τεχνικής Figure-From-Photoshading(τεχνική φωτοσκίασης). Η κύρια διάκριση μεταξύ των δύο μεθόδων είναι ο αριθμός των φωτογραφιών που χρησιμοποιούνται για την αναδόμηση του βάθους. Σε αυτή τη μεθοδολογία, οι εικόνες δείχνουν ένα αντικείμενο από την ίδια οπτική γωνία, αλλά υπό διαφορετικές συνθήκες φωτισμού. Η φωτομετρία μπορεί να ανακτήσει γρήγορα τον προσανατολισμό μιας επιφάνειας αντικειμένου από μια εικόνα φωτεινότητας (κλίμακα του γκρι). Για να πετύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα, άλλοτε χρησιμοποιεί βαθμονομημένες πηγές φωτός και άλλοτε όχι. Η επιλογή του αλγορίθμου βασίζεται στην πολυπλοκότητά του. Οι βαθμονομημένες συνθήκες φωτισμού είναι δυνατές μόνο σε εργαστηριακό περιβάλλον (Hertzmann & Seitz, 2003).

Οι ερευνητές εργάζονται για να τελειοποιήσουν την τεχνική ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιβάλλοντα με γενικό φωτισμό. Η πρόσφατη έρευνα των Hertzmann και Seitz είναι ενδιαφέρουσα καθώς χρησιμοποιεί γνωστά γεωμετρικά αντικείμενα που φωτογραφίζονται κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες φωτισμού δίπλα στο φυσικό αντικείμενο που πρόκειται να συλληφθεί. Σε ένα από τα πειράματά τους, φωτογραφίζουν ένα αντικείμενο που έχει σχήμα ψαριού και έχει πολύπλοκες πληροφορίες υψής. Δύο σφαίρες χρησιμοποιούνται ως αντικείμενα οδήγησης. Η πρώτη σφαίρα έχει γκρι χρώμα και η επιφάνειά της επιτρέπει στο φως να διαχέεται ομοιόμορφα. Το δεύτερο αντικείμενο είναι μαύρο και έχει μια εξαιρετικά ανακλαστική επιφάνεια. Για την ανακατασκευή του αντικειμένου, λήφθηκαν 14 φωτογραφίες υπό διαφορετικές συνθήκες φωτισμού. Τα αποτελέσματα της τεχνικής τους φαίνονται στην εικόνα 52. Το τρισδιάστατο μοντέλο βρέθηκε να είναι εξαιρετικά ρεαλιστικό, γι' αυτό αποφάσισαν να το συγκρίνουν με ένα τρισδιάστατο μοντέλο του ίδιου αντικειμένου που κατασκευάστηκε από έναν σαρωτή δέσμης λέιζερ κοντινής απόστασης. Ένας σαρωτής από την εταιρεία Cyberware14 χρησιμοποιήθηκε για τη συλλογή δεδομένων για αυτήν τη μελέτη (Hertzmann & Seitz, 2003).

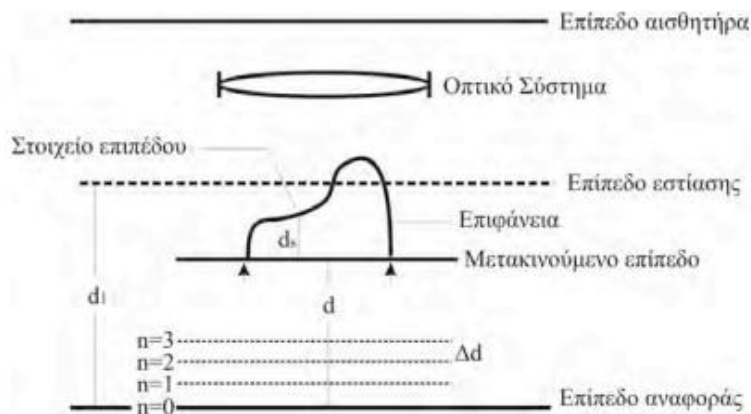
Το συμπέρασμα της έρευνας έδειξε ότι η μέθοδός τους ήταν επιτυχής στην εξαγωγή περισσότερων πληροφοριών από την επιφάνεια ενός αντικειμένου από έναν σαρωτή λέιζερ (Εικόνα 52 β,ii). Ορισμένες από τις γεωμετρικές πληροφορίες στο φωτομετρικό μοντέλο μπορεί να οφείλονται στην υψηλότερη ανάλυση της ψηφιακής κάμερας. Μια άλλη ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι ότι το συγκεκριμένο αντικείμενο καλύπτεται με ένα λεπτό στρώμα βερνικιού. Η μέθοδος της φωτομετρικής στερεοσκοπικής φωτογράφισης είναι πιο πιθανό να αντιληφθεί με ακρίβεια την επιφάνεια κάτω από το βερνίκι, σε αντίθεση με το scanner που αντιλαμβάνεται μόνο την λειασμένη και βερνικωμένη εξωτερική επιφάνεια (Hertzmann & Seitz, 2003). Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι για να ψηφιοποιηθεί το αντικείμενο με τον σαρωτή λέιζερ, έπρεπε να καλυφθεί με ένα στρώμα λευκής σκόνης που επιτρέπει την αναγνώριση της δέσμης φωτός επομένως χάνουμε κάθε πληροφορία χρώματος. Αυτός είναι ένας άλλος παράγοντας που συμβάλλει στην έντονη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο τελικών μοντέλων 3D (Παυλίδης, et al., 2014).



Εικόνα 52 Αποτελέσματα της μεθόδου της φωτομετρικής στερεοσκοπικής φωτογράφισης και σύγκριση της με σαρωτή τριγωνισμού με ακτίνες λέιζερ (Παυλίδης, et al., 2014).

2.2.6. Σαρωτές με τεχνική μεταβαλλόμενης εστίασης.

Το επίκεντρο πολλών ερευνητών τα τελευταία χρόνια είναι σε μια τεχνική που χρησιμοποιεί το βάθος πεδίου για να ανακτήσει την τρίτη διάσταση από μια εικόνα. Η αρχή λειτουργίας του συστήματος φαίνεται στο Σχήμα 53.



Εικόνα 53 Σχεδιάγραμμα αποτύπωσης της μεθόδου μεταβαλλόμενης εστίασης (Παυλίδης, et al., 2014).

Ένα αντικείμενο με άγνωστο τρισδιάστατο σχήμα τοποθετείται σε μια επίπεδη βάση που μπορεί να μετατοπιστεί σε ύψος. Το χαμηλότερο επίπεδο στο οποίο μπορεί να κινηθεί η βάση αναφέρεται ως επίπεδο αναφοράς. Από το συγκεκριμένο σημείο ξεκίνησε η αφετηρία για την κίνηση της βάσης που μετέφερε το προς ψηφιοποίηση αντικείμενο. Η διαμόρφωση ενός οπτικού συστήματος και αισθητήρα (CCD) ορίζει ένα φανταστικό επίπεδο που ονομάζεται εστιακό επίπεδο. Αυτό το επίπεδο εμφανίζεται ως διακεκομμένη γραμμή. Στο επίπεδο εστίασης βρίσκονται ορισμένα μέρη της επιφάνειας του αντικειμένου. Το οπτικό σύστημα επιτρέπει σε αυτά τα μέρη να συλλαμβάνονται από τον αισθητήρα με υψηλό επίπεδο εστίασης. Η απόσταση μεταξύ του επιπέδου εστίασης και του επιπέδου αναφοράς (d_1) είναι πάντα γνωστή (Παυλίδης, et al., 2014).

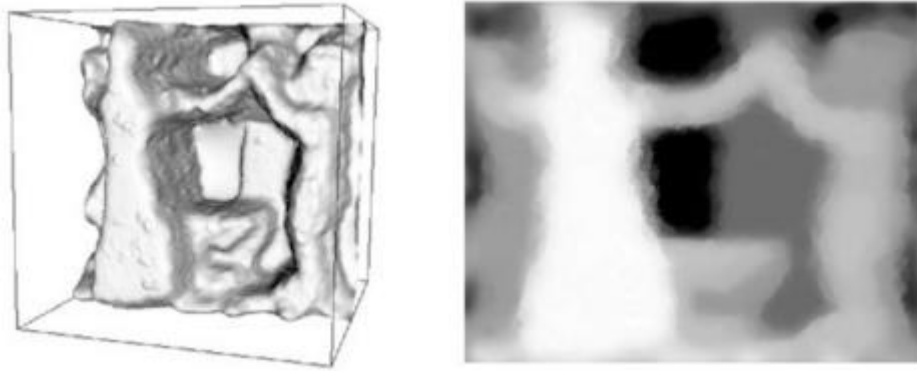
Έστω S ένα στοιχείο σε ένα επίπεδο που βρίσκεται στην επιφάνεια ενός αντικειμένου. Εάν το επίπεδο κινηθεί πιο κοντά στο επίπεδο εστίασης, τότε το S θα αυξήσει τον βαθμό εστίασής του και θα εστιαστεί τέλεια όταν βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με το επίπεδο εστίασης. Εάν μετακινήσουμε το αντικείμενο πιο κοντά στο οπτικό, η εικόνα θα γίνει ξανά θολή. Το ύψος ενός σημείου μπορεί να υπολογιστεί παρατηρώντας τις αλλαγές της εικόνας σε αυτό το σημείο, καταγράφοντας το επίπεδο μετατόπισης στο σημείο μέγιστης εστίασης και, στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας το επίπεδο αναφοράς. Επομένως, είναι ακριβές να πούμε ότι το ds ισούται με d_1 μείον το επίπεδο μετατόπισης (Παυλίδης, et al., 2014).

Αυτή η διαδικασία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό του βάθους της επιφάνειας ενός αντικειμένου σε οποιοδήποτε σημείο. Οι ακόλουθες παρατηρήσεις είναι κοινώς αποδεκτές από όλους τους ερευνητές που έχουν συμμετάσχει στη μελέτη και ανάπτυξη τέτοιων σαρωτών (Schechner, 2000). Η ανάλυση και η ακρίβεια των τεχνικών Shape-By-Variable-Focus είναι περιορισμένες σε σύγκριση με τις τεχνικές τριγωνοποίησης. Αυτές οι τεχνικές αποφεύγουν την τεχνική του ταιριάσματος και των σημείων αντιστοίχισης, τα αποτελέσματά τους χαρακτηρίζονται γενικά ως αξιόπιστα. Υπάρχουν αρκετές πειραματικές λύσεις εφοδιαστικής που επιτρέπουν τον υπολογισμό του βάθους σε πραγματικό χρόνο. Η τεχνική έχει αποδειχθεί ότι είναι πιο αποτελεσματική όταν χρησιμοποιείται σε μικρές αποστάσεις, όπως στη μικροσκοπία (Favaro, 2002).

Παρακάτω μπορούμε να παρατηρήσουμε τη φωτογραφία εκτός εστίασης και την ανακατασκευασμένη τρισδιάστατη επιφάνεια. Το σχήμα δείχνει δύο φωτογραφίες που τραβήχτηκαν με διαφορετικά βάθη πεδίου. Η φωτογραφία στα αριστερά έχει μεγαλύτερο βάθος πεδίου ενώ η φωτογραφία στα δεξιά έχει μικρότερο βάθος πεδίου. Η δεξιά πλευρά της εικόνας 55 δείχνει τον ανακτηθέντα χάρτη βάθους, ενώ η αριστερή πλευρά δείχνει την αντίστοιχη γεωμετρική δομή που αναγνωρίστηκε.

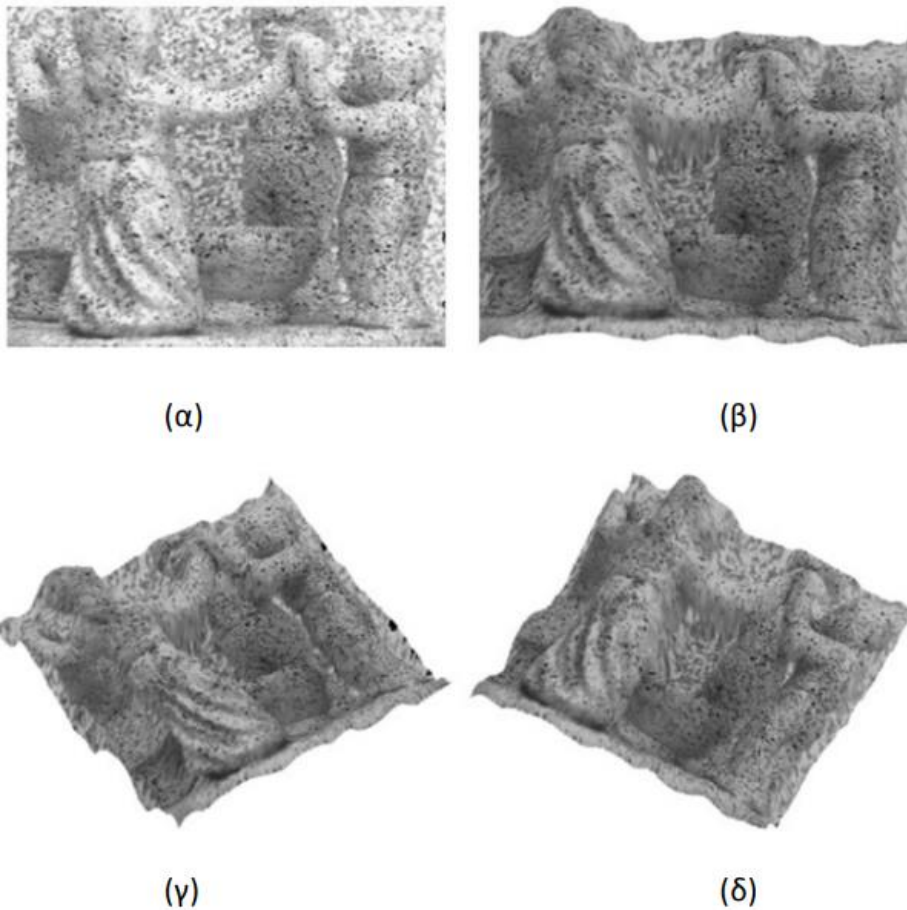


Εικόνα 54 Φωτογραφίες με εστίαση σε διαφορετικά βάθη πεδίου (Favaro, 2002).



Εικόνα 55 Το αποτέλεσμα της τρισδιάστατης αποτύπωσης στα αριστερά και ο χάρτης βάθους στα δεξιά (Favaro, 2002).

Η εικόνα 56 απεικονίζει το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας κατά την οποία έχουν προστεθεί πληροφορίες για την υφή της επιφάνειας στη γεωμετρία. Το σχήμα 56a απεικονίζει την εικόνα που έχει ανακατασκευαστεί και οι άλλες εικόνες δείχνουν το τρισδιάστατο μοντέλο από διάφορες οπτικές (Favaro, 2002).



Εικόνα 56 Το τελικό αποτυπωμένο μοντέλο σε τρεις διαστάσεις (Favaro, 2002).

3. Τρισδιάστατη αναπαράσταση Αντικειμένων Πολιτισμικής Κληρονομιάς

3.1. Γενική Περιγραφή.

Οι απαιτητικές συνθήκες της αγοράς του 21ου αιώνα απαιτούν τη συνεχή εξέλιξη των υφιστάμενων προϊόντων. Από πολυεθνικές κολοσσούς, έως μικρού μεγέθους εταιρείες, η καινοτομία αποτελεί μονόδρομο στο διαρκή αγώνα προσφοράς του καλύτερου δυνατού προϊόντος, πάντα σε συνάρτηση με τις ανάγκες του καταναλωτή. Η ανακάλυψη νέων υλικών, η εισαγωγή καινούργιων μεθόδων κατασκευής και η συνεχής εστίαση στην έρευνα και τη ανάπτυξη νέων προϊόντων έθεσε ένα άκρως ανταγωνιστικό περιβάλλον που εξελίσσεται με ταχύτατους ρυθμούς. Έτσι, η ανάγκη για την ελαχιστοποίηση του χρόνου παραγωγής του προϊόντος είναι πιο εμφανής από ποτέ. Παρόλα αυτά, οι υφιστάμενες μέθοδοι κατασκευής βιομηχανικών πρωτοτύπων δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν στα απαιτητικά χρονικά όρια που θέτουν οι εταιρείες που επιδιώκουν να κερδίσουν πλεονέκτημα έναντι των ανταγωνιστών τους. Τα πρωτότυπα, σε μεγάλο βαθμό μέχρι και σήμερα κατασκευάζονται κυρίως από ξύλο, γύψο ή πηλό. Αυτό αποτελεί μία χρονοβόρα και σπάταλη σε υλικό μέθοδο, καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται τεχνολογίες αφαιρετικής επεξεργασίας όπως αυτή του CNC. Επιπλέον, αυτού του είδους τα πρωτότυπα εξυπηρετούσαν μόνο οπτικούς σκοπούς και δεν μπορούσαν να σταθούν ως λειτουργικά πρωτότυπα.

Με στόχο την αντιμετώπιση των προαναφερόμενων περιορισμών, στη κατασκευή πρωτοτύπων εισήχθη μια νέα μέθοδος κατασκευής. Η μέθοδος αυτή εντάσσει την κατασκευή τρισδιάστατων στερεών αντικειμένων από ένα ψηφιακό αρχείο CAD. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της προσθετικής κατασκευής (Additive Manufacturing «AM») όπου με την εναπόθεση διαδοχικών στρώσεων υλικού οδηγούμαστε στην τελική δημιουργία ενός πραγματικού φυσικού αντικειμένου. Κάθε στρώμα μπορεί να απεικονιστεί ως λεπτή οριζόντια διατομή του τελικού προϊόντος. Αυτή η τεχνολογία είναι γνωστή ως "Rapid Prototyping" (στο εξής αναφέρεται επίσης ως "RP") και επιτρέπει τη γρήγορη και εύκολη μετάβαση ενός σχεδίου CAD στη κατασκευή φυσικών αντικειμένων. Η συμβολή του στη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ του σχεδιασμού του προϊόντος και τον χρόνο κατασκευής του πρωτοτύπου είναι τεράστια, εξ ου και ο όρος "ταχύς". Αυτή η τεχνολογία συχνά περιγράφεται ως «η τρίτη βιομηχανική επανάσταση» (Berman, 2012) και μέσω μιας σειράς τεχνικών προόδων μπορεί να χαρακτηριστεί στις μέρες μας και ως μέθοδος κατασκευής τελικού προϊόντος.

Η σύγχρονη παραγωγή προσθετικής κατασκευής χρονολογείται από τη δεκαετία του 1980 με την πρώτη αναφορά της στερεολιθογραφίας. Οι τεχνολογικές καινοτομίες στο τομέα των οικιακών υπολογιστών και η πλέον αυξημένη διαθεσιμότητα βιομηχανικών λέιζερ οδήγησαν στην ανάπτυξη πολλών νέων AM διεργασιών στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και της δεκαετίας του 1990 (Bourell, 2009). Κάποιες από τις διεργασίες που θεωρούνται AM είναι, η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ S.L.S. (Selective Laser Sintering), η τεχνολογία F.D.M (Fused Deposition Modeling) και τρισδιάστατη εκτύπωση (3D Printing). Τα επόμενα χρόνια, η AM επεξεργασίες χρησιμοποιήθηκαν σε πολλούς τομείς όπως η αεροδιαστημική, οι ιατρικές επιστήμες, παραγωγή ενέργειας, παραγωγή αυτοκινήτων και καταναλωτικών αγαθών. Ο αντίκτυπος της τεχνολογίας AM συνεχίζει να αναπτύσσεται λόγω της ακόμη βαθύτερης διείσδυσής του στα προαναφερθέντα πεδία. Επιπρόσθετα, μέσω ενός συνεχώς αυξανόμενου αριθμού ατόμων που χρησιμοποιούν παγκοσμίως

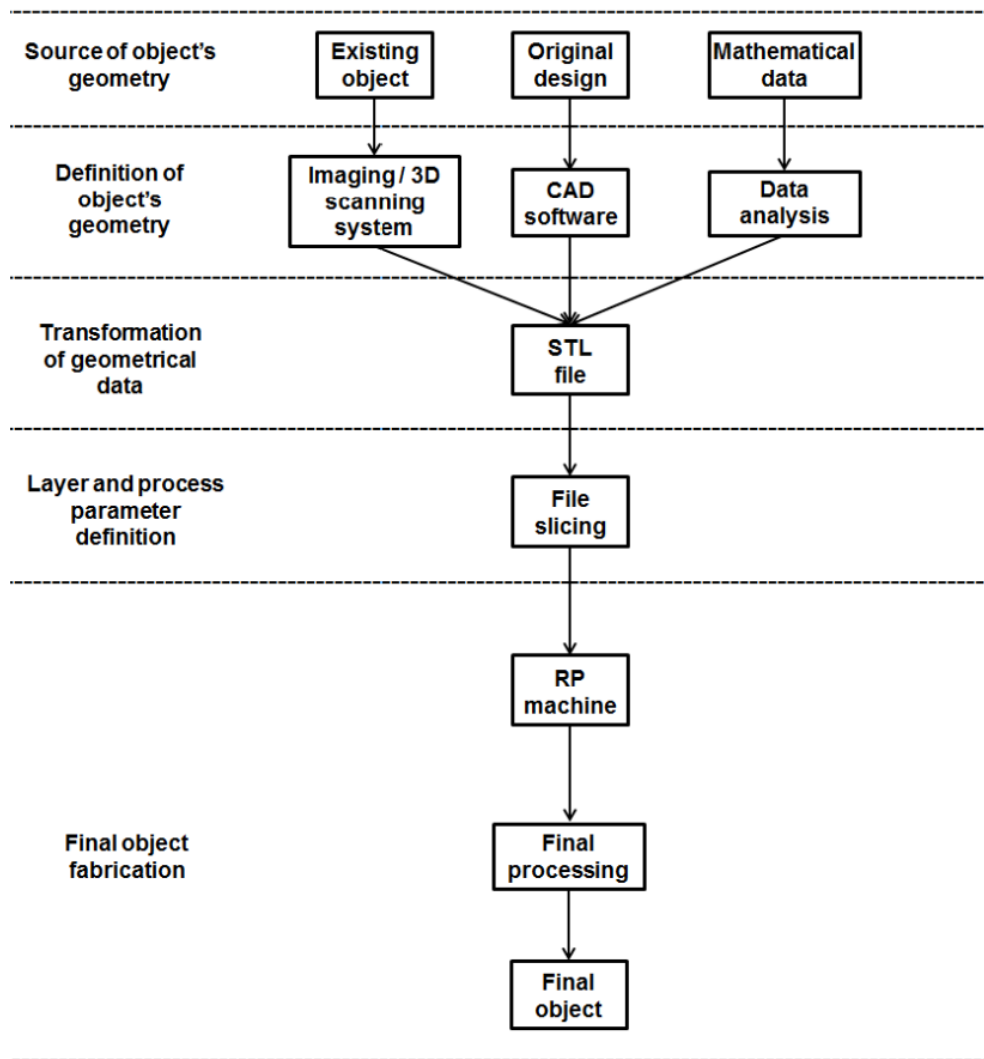
το τρισδιάστατο εκτυπωτή ως χόμπι, φαίνεται πως σχεδόν κάθε νοικοκυριό του ανεπτυγμένου κόσμου θα εντάξει τον 3D εκτυπωτή στις βασικές οικιακές συσκευές του την επόμενη δεκαετία.

3.2. Υλικά και Τεχνικές.

Διάφορες τεχνικές χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τρισδιάστατων αντικειμένων. Οι μέθοδοι αυτοί έχουν πολλά κοινά χαρακτηριστικά σχεδόν σε όλα τα στάδια τους, από το αρχικό στάδιο του σχεδιασμού έως την τελική κατασκευή του επιθυμητού αντικειμένου. Αρχικά, το εξάρτημα σχεδιάζεται είτε σε χαρτί, είτε ψηφιακά σε λογισμικό CAD. Έπειτα, με την παραδοσιακή αφαιρετική κατεργασία, το αντικείμενο δημιουργείται με την αφαίρεση υλικού από ένα αρχικό «μπλοκ» του επιθυμητού υλικού. Έτσι, ένα μεγάλο ποσοστό ακατέργαστου υλικού απορρίπτεται, με αποτέλεσμα υψηλό περιβαλλοντικό και οικονομικό κόστος. Στη περίπτωση διεργασιών χύτευσης με έγχυση, η πρώτη ύλη θερμαίνεται στο σημείο τήξης και πλέων σε υγρή μορφή εκχύνεται μέσα σε ειδικά σχεδιασμένα και προσαρμοσμένα καλούπια. Τα εξειδικευμένα εργαλεία, τα ακριβά και εξατομικευμένα καλούπια μαζί με πολλές δοκιμές για την παραγωγή και την τελειοποίηση του τελικού προϊόντος οδηγούν σε ανεπιθύμητο υψηλό κόστος και σπατάλη χρόνου. Επιπλέον, είναι εμφανής η ανάγκη της ανθρώπινης παρέμβασης, με την απαίτηση υψηλά εξειδικευμένου προσωπικού σε όλα τα προαναφερθέντα στάδια. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς των παραδοσιακών τεχνικών κατασκευής, η τεχνολογία AM αναδύεται ως μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος κατασκευής που παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα.

Με μια πρώτη ματιά, οι τεχνικές της AM δίνουν την ικανότητα στους σχεδιαστές να σχεδιάζουν τρισδιάστατα αντικείμενα και να τα κατασκευάζουν στο γραφείο τους άμεσα και οικονομικά. Με αυτόν τον τρόπο, οι σχεδιαστές έχουν την δυνατότητα να εξετάσουν γρήγορα το σχέδιό τους σε φυσική μορφή. Έτσι, μπορούν να αξιολογήσουν το σχεδιασμό τους και να είναι σε θέση να πραγματοποιήσουν τις απαραίτητες τροποποιήσεις που θα οδηγήσουν στο ιδανικό προϊόν. Επομένως, με έγκαιρο και οικονομικά αποδοτικό τρόπο, οι σχεδιαστές έχουν την ευκαιρία να βελτιώσουν τα αρχικά τους σχέδια κατεύθυνση του επιθυμητού αντικειμένου.

Όπως περιεγράφηκε πρωτύτερα, η AM είναι η ομάδα μεθόδων και τεχνικών που παρουσιάζουν τη δυνατότητα κατασκευής αντικειμένων τριών διαστάσεων απευθείας από CAD αρχεία. Κοινό χαρακτηριστικό τους είναι η εναπόθεση πρώτης ύλης στρώμα-στρώμα σε δισδιάστατο επίπεδο (x-y). Η τρίτη διάσταση (z) προέρχεται από η ένωση των εναποτιθέμενων στρωμάτων το ένα πάνω στο άλλο. Πιο συγκεκριμένα, ASTM F2792-12A πρότυπη ορολογία για Τεχνολογίες Προσθετικής Κατασκευής ορίζει την τρισδιάστατη (3D) εκτύπωση, η οποία είναι στην πραγματικότητα ένα υποσύνολο της προσθετικής κατασκευής, ως η διαδικασία ένωσης υλικού στρώμα προς στρώμα ώστε να δημιουργηθούν αντικείμενα από αρχεία τρισδιάστατων μοντέλων. Δεν χρησιμοποιούν όλες οι τεχνικές AM την ίδια τεχνολογία για την παραγωγή ενός τελικού αντικειμένου. Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί μέθοδοι ώστε να επιτευχθεί αυτό, ωστόσο όλοι μοιράζονται μια κοινή αρχή το να προσθέτουν ύλη. Ορισμένες μέθοδοι χρησιμοποιούν τήξη υλικών ενώ άλλοι χρησιμοποιούν συνδεδετικούς παράγοντες μεταξύ γειτονικών στρωμάτων όπως για παράδειγμα κάποιο είδος κόλας. Παρά τις διαφορετικές τεχνικές και φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρο στις διάφορες μεθόδους AM, τα κύρια στάδια της διαδικασίας είναι κοινά. Αυτά τα στάδια παρουσιάζονται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα.



Εικόνα 57 Χαρακτηριστική διαδικασία των σταδίων της τεχνολογίας προσθετικής επεξεργασίας.

Το αρχικό στάδιο όλων των μεθόδων AM είναι η γεωμετρία του επιθυμητού αντικείμενου που πρόκειται να κατασκευαστεί. Αυτό μπορεί να προέρχεται είτε από ένα υπάρχον αντικείμενο, ένα καινούργιο σχέδιο ή γεωμετρία που περιγράφεται από μαθηματικά δεδομένα. Το επόμενο στάδιο αποτελεί μια προσπάθεια περαιτέρω προσδιορισμού της γεωμετρίας του αντικείμενου. Σε αυτό το σημείο, ένα ήδη υπάρχον αντικείμενο πρέπει να αποτυπωθεί ψηφιακά με την βοήθεια ενός 3D σαρωτή (3D Scanner). Ο 3D σαρωτής είναι μια συσκευή που αναλύει ένα αντικείμενο ή περιβάλλον στο πραγματικό κόσμο και συλλέγει δεδομένα σχετικά με το σχήμα του. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη κατασκευή ψηφιακών τρισδιάστατων μοντέλων (Kim Pileun, 2018). Ομοίως, ένα πρωτότυπο σχέδιο πρέπει να δημιουργηθεί και να υποβληθεί σε επεξεργασία σε λογισμικό CAD όπου ένα τελικό αρχείο θα δημιουργηθεί και θα περιέχει όλες τις απαραίτητες γεωμετρικές πληροφορίες. Τα μαθηματικά δεδομένα θα πρέπει επίσης να υποβάλλονται για ανάλυση προκειμένου να συγκεντρώσουν την τρισδιάστατη γεωμετρία του αντικείμενου.

Το επόμενο στάδιο αναφέρεται στον μετασχηματισμό των γεωμετρικών δεδομένων, ανεξάρτητα από την πηγή τους. Το STL είναι μια μορφή αρχείου εγγενή στη στερεολιθογραφία Λογισμικού CAD, γνωστό και ως Standard Tessellation Language. Αυτή η μορφή αρχείου υποστηρίζεται από πολλά άλλα πακέτα λογισμικού και χρησιμοποιείται ευρέως για την ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων και τη

κατασκευή με τη βοήθεια υπολογιστή. Τα αρχεία STL περιγράφουν μόνο τη γεωμετρία της επιφάνειας ενός τρισδιάστατου αντικειμένου χωρίς καμία αναπαράσταση του χρώματος, την υφή ή άλλα χαρακτηριστικά του μοντέλου CAD. Περιγράφεται από μια ακατέργαστη αδόμητη τριγωνική επιφάνεια και τις τρεις κορυφές (ταξινομημένες κατά τον κανόνα του δεξιού χεριού) του τριγώνου χρησιμοποιώντας το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων. Οι συντεταγμένες STL πρέπει να είναι πάντα θετικοί αριθμοί, δεν υπάρχουν πληροφορίες κλίμακας και οι μονάδες μέτρησης είναι αυθαίρετες (Burns, 1999). Στη συνέχεια, το αρχείο STL αποστέλλεται σε κάποιο “slicing” λογισμικό εξειδικευμένο στην αντίστοιχη AM τεχνική που θα χρησιμοποιήσουμε. Εκεί, το αρχείο STL ουσιαστικά τεμαχίζεται στα επίπεδα που θα αποτελέσουν την τελική δομή του αντικειμένου. Σε εκείνο το σημείο, η επιθυμητοί παράμετροι της διαδικασίας ορίζονται από τον χρήστη σε μια προσπάθεια να κατασκευάσει προσαρμοσμένα αντικείμενα που θα ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις του. Τέλος, αποστέλλεται το αρχείο του επεξεργασμένου αντικειμένου στο αντίστοιχο μηχάνημα AM όπου γίνονται αυτόματα οι τελικές παράμετροι εκτύπωσης και λαμβάνει χώρα η κατασκευή του αντικειμένου. Οι επικρατέστερες τεχνικές AM παρουσιάζονται παρακάτω ώστε να εξοικειωθούμε με τα μοναδικά υλικοτεχνικά χαρακτηριστικά τους.

3.2.1. Στερεολιθογραφία/Stereolithography (SLA)

Η στερεολιθογραφία εφευρέθηκε από την 3DSystems το 1986, όντας η πρώτη εμπορικά διαθέσιμη τεχνική AM. Η στερεολιθογραφία αποτελεί μια μέθοδο προσθετικής κατασκευής που επιτρέπει την κατασκευή εξαρτημάτων από ένα αρχείο (CAD). Από άποψη ακρίβειας και ανάλυσης, η στερεολιθογραφία είναι καλύτερη από άλλες AM τεχνικές. Ενώ στις περισσότερες τεχνικές AM το επίπεδο ακρίβειας βρίσκεται στα 50-200μm, η μέθοδος της στερεολιθογραφίας μπορεί να κατασκευαστεί αντικείμενα με ακρίβεια 20 μm. Η επιθυμητή εξωτερική και εσωτερική γεωμετρία της δομής που θα κατασκευαστεί μπορεί είτε να προέρχεται από τρισδιάστατα αρχεία CAD είτε από δεδομένα σάρωσης τεχνολογιών (κλινικής) απεικόνισης όπως η μαγνητική τομογραφία (MRI), ή τεχνικές τομογραφίας (Burns, 1999). Η δυνατότητα χρήσης δεδομένων από σαρώσεις καθιστά τη στερεολιθογραφία ιδιαίτερα χρήσιμη για εφαρμογές στη βιοϊατρική μηχανική, καθώς επιτρέπει την κατασκευή μοντέλων για συγκεκριμένους ασθενείς ή εμφυτεύματα.

Αυτή η τεχνική κατασκευάζει αντικείμενα ξεκινώντας με ένα υγρό πολυμερές (υλικό βάσης) που μπορεί να μετατραπεί σε στερεή κατάσταση όταν εκτεθεί σε συγκεκριμένο τύπο ακτινοβολίας. Μια συγκεντρωμένη δέσμη υπεριώδους φωτός εστιάζεται στην επιφάνεια της δεξαμενής γεμάτη με υγρό φωτοπολυμερές, η δέσμη φωτός, ψηφιακά ελεγχόμενη, τραβάει κάθε στρώμα του αντικειμένου στην επιφάνεια του υγρού. Στο σημείο όπου η δέσμη χτυπά την επιφάνεια, το φωτοπολυμερές πολυμερίζεται και μετατρέπεται σε στερεή κατάσταση (P.M. & et.al, 2012). Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας ακτίνα λέιζερ ελεγχόμενη από υπολογιστή ή ψηφιακός προβολέας φωτός επίσης ελεγχόμενο από υπολογιστή, ένα μοτίβο φωτίζεται στην επιφάνεια της ρητίνης. Στη συνέχεια, η ρητίνη στο μοτίβο αυτό στερεοποιείται σε ένα προκαθορισμένο βάθος, οδηγώντας το σε σύνδεση με μια πλατφόρμα υποστήριξης. Μετά τον φωτοπολυμερισμό της πρώτης στρώσης, η πλατφόρμα απομακρύνεται από την επιφάνεια και το κατασκευασμένο στρώμα επικαλύπτεται εκ νέου με υγρή ρητίνη προκειμένου να σχηματιστεί το δεύτερο στρώμα. Καθώς το βάθος σκλήρυνσης είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το βύθισμα της πλατφόρμας σε ύψος, εξασφαλίζεται καλή συνοχή με την πρώτη στρώση (η υγρή ρητίνη που δεν αντέδρασε στο πρώτο στρώμα πολυμερίζεται με τη φωτιζόμενη ρητίνη στο δεύτερο στρώμα). Αυτά τα βήματα (η κίνηση της πλατφόρμας και η σκλήρυνση ενός ορισμένου μοτίβου σε ένα στρώμα ρητίνης) επαναλαμβάνονται για την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου στερεού, τρισδιάστατου αντικείμενο. Μετά την αποστράγγιση και το πλύσιμο της

περίσσειας ρητίνης, λαμβάνεται μια σχεδόν ολοκληρωμένη δομή του αντικειμένου. Σε αυτή τη δομή, ο μετασχηματισμός/πολυμερισμός των αντιδρώντων ομάδων(υγρή ρητίνη) είναι συνήθως ατελής και συχνά εφαρμόζεται μετα-πολυμερισμός με (στροβοσκοπικό) υπεριώδες φως για την ενίσχυση της μηχανικής συμπεριφοράς του προϊόντος. Επιπλέον, οι παράμετροι όπως ο προσανατολισμός κατασκευής παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στις τελικές μηχανικές ιδιότητες του αντικειμένου. Ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων προτείνεται από ερευνητές προς την κατεύθυνση της αυτοματοποίησης της επιλογής προσανατολισμού του αντικειμένου στη διαδικασία SL. Η προτεινόμενη μεθοδολογία χρησιμοποιεί γενετικό αλγόριθμο, χρησιμοποιώντας μια αντικειμενική συνάρτηση πολλαπλών κριτηρίων για την αξιολόγηση των επιτεύξιμων προσανατολισμών και επιλέγει τον προσανατολισμό που θα χρειαστεί τα λιγότερα στηρίγματα (Giannatsis J, 2007) (Canellidis V, 2009). Στη στερεολιθογραφία, ο έλεγχος του του πάχους της στρώσης που σκληρύνεται είναι απαραίτητος. Για μια δεδομένη ρητίνη, η το βάθος οπου «θεραπεύεται» (σκληρύνεται) καθορίζεται από την ενέργεια του φωτός στο οποίο εκτίθεται η ρητίνη. Αυτή η ενέργεια μπορεί να ελεγχθεί ρυθμίζοντας την ισχύ της πηγής φωτός και η ταχύτητα σάρωσης (για συστήματα λέιζερ) ή ο χρόνος έκθεσης (για συστήματα με προβολέα φωτός) (Melchels F.P.W, 2010). Η παρακάτω φωτογραφία απεικονίζει μια συσκευή στερεολιθογραφίας.



Εικόνα 58 Ένας 3D Εκτυπωτής ρητίνης τεχνολογίας SLA (Πηγή)

Ένας αριθμός υγρών φωτοπολυμερών είναι διαθέσιμος για στερεολιθογραφία. Τα εποξειδικά υλικά και τα υβρίδια έχουν αντικαταστήσει τα παλαιότερα χρησιμοποιούμενα ακρυλικά λόγω υψηλότερης αντοχής, υψηλότερης αντοχής στη θερμοκρασία, χαμηλότερης απορρόφησης υγρασίας και τάση παραμόρφωσης. Ένα βασικό μειονέκτημα της χρήσης των ακρυλικών υλικών που σκληραίνονται με ακτινοβολία είναι το εμπόδιο που δημιουργείται από τον εγκλωβισμό του οξυγόνου κατά την διαδικασία της εκτύπωσης. Ελαστική σιλικόνη, ουρεθάνη, εποξειδικά και πολλά είδη εγκεκριμένων υλικών ιατρικής ποιότητας από τον FDA μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Φωτοπολυμερείς ρητίνες με μηχανικές ιδιότητες παρόμοιες με πλαστικά μηχανικής όπως ABS (ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο), νάιλον και πολυανθρακικό χρησιμοποιούνται επίσης (P.M. & et.al, 2012). Στην περίπτωση των ρητινών, η ρητίνη πρέπει να είναι υγρό που στερεοποιείται γρήγορα κατά την έκθεση του στο

φως. Οι πρώτες ρητίνες που αναπτύχθηκαν για χρήση σε στερεολιθογραφία βασίστηκαν σε χαμηλού μοριακού βάρους πολυακρυλικό ή εποξειδικό μακρομερή που σχηματίζει υαλώδη δίκτυα όταν υποβάλλονται σε πολυμερισμό φωτός και προσκόλληση. Έχει αναπτυχθεί μεγάλος αριθμός ρητινών τις τελευταίες δύο δεκαετίες, και οι μηχανικές ιδιότητες που λαμβάνουν μετά τη σκλήρυνση τους έχουν βελτιωθεί ραγδαία. Τα περισσότερα από τις διαθέσιμες στερεολιθογραφικές ρητίνες βασίζονται σε χαμηλού μοριακού βάρους, πολυλειτουργικά μονομερή και σχηματίζουν δεσμούς υψηλής διασύνδεσης. Αυτά τα υλικά παρουσιάζουν συνήθως ιδιότητες παρόμοιες με το γυαλί, δηλαδή άκαμπτα και εύθραυστα. Ένα ευρύ φάσμα ρητινών έχει υποστεί επεξεργασία ώστε να χρησιμοποιηθεί στην στερεολιθογραφία, οδηγώντας σε αντικείμενα με διάφορα χαρακτηριστικά. Αν και ο αριθμός των διαθέσιμων ρητινών αυξάνεται, η τεχνική εξακολουθεί να περιορίζεται στη χρήση μιας μόνο ρητίνης κάθε φορά. Ενώ την ίδια στιγμή, οι τεχνικές τρισδιάστατης εκτύπωσης τεχνολογίας FDM έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν πολλαπλά καρούλια ώστε να παρασκευάσουν προϊόντα που αποτελούνται από διαφορετικά υλικά ταυτόχρονα. Ο περιορισμός της χρήσης μόνο μιας ρητίνης στη διαδικασία της στερεολιθογραφίας είναι ίσως και ο μεγαλύτερος περιορισμός της τεχνικής (Melchels F.P.W, 2010).



Εικόνα 59 Μια γραφική αναπαράσταση της βασικής λειτουργίας της στερεολιθογραφίας (SLA) στην τρισδιάστατη εκτύπωση.

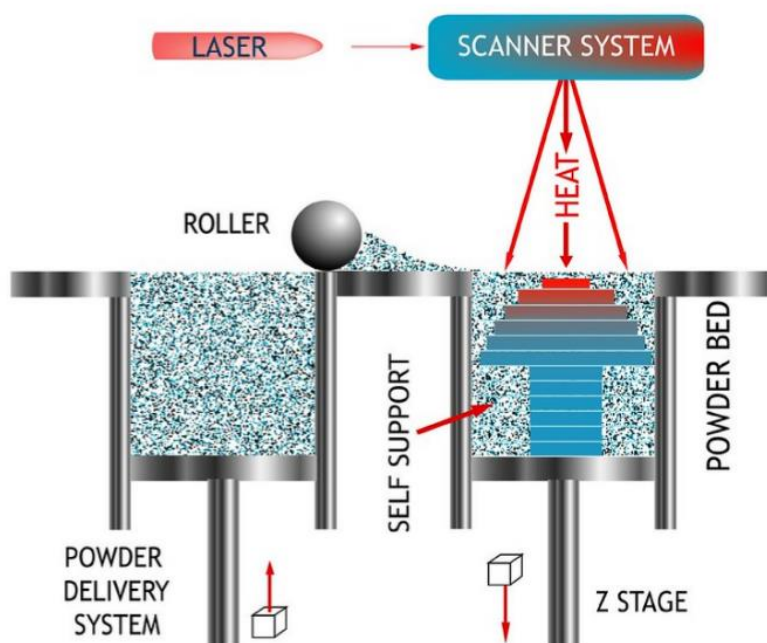
3.2.2. Επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ/Selective Laser Sintering (SLS)

Η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS) εφευρέθηκε στο Πανεπιστήμιο του Τέξας στο Austin και διατέθηκε για εμπορική χρήση από δύο εταιρείες, την DTM Corporation και EOS GmbH Electro Optical Systems. Ο όρος πυροσυσσωμάτωση αναφέρεται στη διαδικασία μεταλλουργίας της σκόνης, στην οποία η σκόνη κάτω από υψηλή θερμοκρασία και πίεση για μεγάλο χρονικό διάστημα στερεοποιείται (Taimisto, 2009). Ένα μηχάνημα SLS αποτελείται από έναν υπολογιστή ελέγχου, έναν θάλαμο κατασκευής, ένα διανομέα σκόνης, ένα κύλινδρο κατασκευής, μια λεπίδα καθαρισμού και μια μονάδα λέιζερ που κάνει χρήση ενός λέιζερ CO₂ συνεχής δέσμης, σταθερής μέσης ισχύος που κυμαίνεται από 50 W έως 200 W. Το λέιζερ μπορεί να εκπέμπει είτε σε συνεχή είτε σε παλμική

λειτουργία και χρησιμοποιείται ως πηγή θερμότητας για την ένωση της σκόνης ως πρώτη ύλη στο επιθυμητό στρώμα μέγεθος και σχήμα (Kumar, 2003). Η πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ είναι μια περίπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει διάφορους παράγοντες που εξαρτώνται από την εισροή ενέργειας. Ιδιότητες τελικού προϊόντος, όπως π.χ η γεωμετρία, η ακρίβεια και οι μηχανικές ιδιότητες (π.χ. πυκνότητα, αντοχή κ.λπ.) εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την εισροή ενέργειας. Οι βελτιστοποιημένες παράμετροι καθορίζονται από την λειτουργία και τις ιδιότητες που επιθυμούμε από το τελικό προϊόν. Οι παράμετροι του λέιζερ συνήθως περιλαμβάνουν παράγοντες όπως η ισχύς λέιζερ, το μέγεθος της δέσμης φωτός και τη ταχύτητα της σάρωσης του λέιζερ. Συνήθως, το πάχος του στρώματος της σκόνης και ο αριθμός των σαρώσεων που πραγματοποιεί η δέσμη φωτός του λέιζερ στην πλατφόρμα ακολουθώντας την προκαθορισμένη πορεία ακολουθώντας το σχήμα του προϊόντος αναφέρονται ως γεωμετρικές παράμετροι της διαδικασίας. Σημαντικό ρολό επίσης στη διαδικασία πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ παίζουν οι ιδιότητες του υλικού. Αλλάζοντας τις παραμέτρους του λέιζερ (ταχύτητα σάρωσης, συνεχές κύμα, παλμικό κύμα) έχει αποδειχθεί να επιφέρει τεράστιες αλλαγές στο προϊόν που θα έχουμε ως αποτέλεσμα της διαδικασίας της πυροσυσσωμάτωσης (Taimisto, 2009).

Στην τεχνική της πυροσυσσωμάτωσης με λέιζερ, τα αντικείμενα κατασκευάζονται στρώμα προς στρώμα από αρχική ύλη σε μορφή σκόνης. Το αντικείμενο κατασκευάζεται μέσα σε ένα κυλινδρικό έμβολο, το οποίο μπορεί να περιλαμβάνει σύστημα προθέρμανσης. Η σκόνη απλώνεται πάνω από το έμβολο με την βοήθεια ρολού ή σαρώθρου. Λεπτό στρώμα σκόνης «λιώνει» σε προκαθορισμένα σημεία με λέιζερ για να σχηματιστεί ένα στερεό στρώμα. Χαμηλώνοντας το ύψος της ήδη πυροσυσσωματωμένης στρώσης και ξανά επικαλύπτοντας τη πρώτη στρώση με νέα ακατέργαστη σκόνη, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία και το καινούργιο στρώμα στερεοποιείται και κατά συνέπεια συνδέεται με το προηγούμενο στρώμα. Η σκόνη έχει την δυνατότητα να προθερμαθεί κοντά στη θερμοκρασία τήξης ήδη μέσα στον θάλαμο και η δέσμη λέιζερ χρησιμοποιείται μόνο για την προσθήκη μίας μικρής θερμικής ενέργειας ώστε να «λιώσει» τα στρώματα σκόνης και να τα προσκολλήσει μεταξύ τους. Η προθέρμανση μειώνει την απαιτούμενη ενέργεια που θα απαιτούσε το λέιζερ, ενώ παράλληλα αντισταθμίζει τη θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των στρωμάτων. Η μείωση της διαφοράς θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση των εσωτερικών τάσεων και των πιθανών παραμορφώσεων. Η οξείδωση του υλικού πρέπει να αποφεύγεται και αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με την παραγωγή αδρανούς ατμόσφαιρα στον θάλαμο κατασκευής(κενό αέρος). Αυτό επιτυγχάνεται με την παρουσία αζώτου μέσα στην ατμόσφαιρα του μηχανήματος. Αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία, ο θάλαμος περιβάλλεται από μη πυροσυσσωματωμένη σκόνη (Taimisto, 2009). Η σκόνη που δεν έχει σαρωθεί από το λέιζερ παρέχει υποστήριξη στο επόμενο στρώμα σκόνης και μειώνει την πιθανότητα στρέβλωσης του προϊόντος. Όταν ολοκληρωθεί μια στρώση, ο κύλινδρος «στρώνει» ένα νέο στρώμα σκόνης πάνω από το πυροσυσσωματωμένο για το επόμενο πέρασμα (Yan X, 1996). Η μη πυροσυσσωματωμένη σκόνη αφαιρείται από το τελικό προϊόν με βούρτσισμα, αέρα ή ειδική ηλεκτρική σκούπα. Η περίσσεια σκόνης μπορεί στη συνέχεια να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί ξανά στην επόμενη εκτύπωση (Taimisto, 2009). Το ακόλουθο σχήμα δείχνει μια σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας SLS.

SELECTIVE LASER SINTERING 3D Systems, Inc.



Εικόνα 60 Διαδικασία 3D εκτύπωσης με επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ SLS [\(πηγή\)](#)

Ένας μεγάλος αριθμός υλικών έχει χρησιμοποιηθεί στην τεχνολογία SLS. Κάποια από αυτά είναι: κεριά, κεραμικά, σύνθετα υλικά νάιλον/γυαλιού, σκόνης μεταλλοπολυμερών, μέταλλα, κράματα ή χάλυβες, πολυμερή, νάιλον και ανθρακικό άλας. Οι σκόνης πολυανθρακικού και το πολυανθρακικό Bish-phenol-A χρησιμοποιήθηκαν αρχικά ως υλικά για πειραματισμούς και μοντελοποίηση του SLS. Μέχρι τώρα, ένας αριθμός μεταλλικών συστημάτων (π.χ. Fe-Cu, Fe-Sn, Cu-Sn), μέταλλα Ti, Fe, Cu), κεραμικά (Al₂O₃, FeO, NiO, ZrO₂, SiO₂, CuO) και κράματα (π.χ. με βάση το κοβάλτιο, με βάση το νικέλιο, μπρούτζο-νικέλιο, προ-κράμα μπρούτζου-νικελίου, Inconel 625, Ti-6Al-4V, ανοξείδωτος χάλυβας, ανοξείδωτος χάλυβας με ψεκασμό αερίου 316L, ανθρακούχο χάλυβα AISI 1018, χάλυβας υψηλής ταχύτητας και προεπικαλυμμένη άμμος χυτηρίου δοκιμάστηκαν για πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι σχεδόν οποιοδήποτε υλικό μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν συνδυάζεται με υλικό χαμηλού σημείου τήξης που θα χρησιμεύσει ως δεσμευτικός παράγοντας (Kumar, 2003).

Η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ έχει πολλά πλεονεκτήματα. Πρώτον, υπάρχει σχεδόν απεριόριστη επιλογή πρώτων υλών. Δεύτερον, στις περισσότερες περιπτώσεις τα τελικά κατασκευασμένα αντικείμενα έχουν αξιοσημείωτες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες. Τα τελικά αντικείμενα είναι αμέσως έτοιμα για χρήση αφού αφαιρεθεί η μη πυροσυσσωματωμένη σκόνη. Τέλος ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα είναι ότι δεν απαιτείται υλικό υποστήριξης κατά την εκτύπωση SLS καθώς η μη πυροσυσσωματωμένη σκόνη έχει το ρόλο του στηρίγματος (Taimisto, 2009).

Ωστόσο, η επιλεκτική πυροσυσσώματωση με λέιζερ έχει επίσης ορισμένα μειονεκτήματα. Πρώτον, η ακρίβεια του τελικού μέρους περιορίζεται βασικά από το μέγεθος των σωματιδίων της σκόνης. Επιπλέον σε κάποια υλικά μπορεί να παρουσιαστεί συρρίκνωση των τελικών κατασκευασμένων αντικειμένων και το γεγονός αυτό μπορεί να μειώσει την ακρίβειά. Η συρρίκνωση μπορεί επίσης να προκαλέσει τάση και καταπόνηση στο πυροσυσσώματωμένο τμήμα μειώνοντας τις μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος σε κάποιες περιπτώσεις ή σε άλλες μπορεί να οδηγηθεί ακόμα και στην θραύση του. Τέλος, απαιτούνται αυστηρά επαγγελματίες χειριστές λόγω της μεγάλης ποικιλίας διαδικασιών παραμέτρους που πρέπει να προκαθοριστούν όπως και των κινδύνων που συνοδεύονται με τα υψηλής θερμοκρασίας μηχανήματα (Taimisto, 2009).



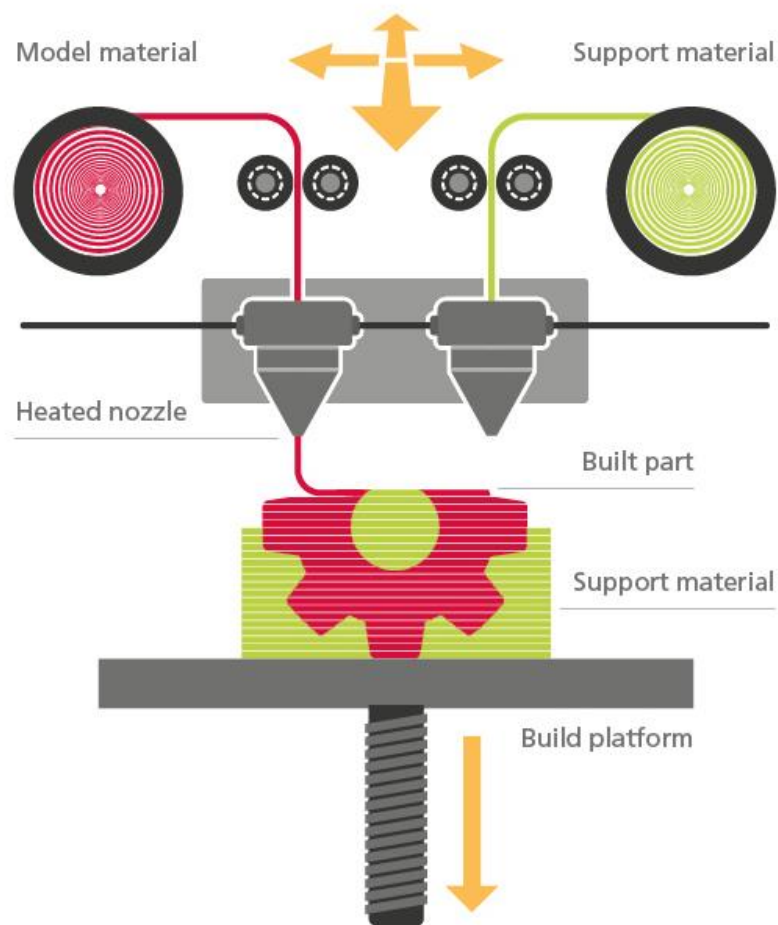
Εικόνα 61 3D Εκτυπωτής Τεχνολογίας SLS [\(πηγή\)](#)

3.2.3. Μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης/Fused Deposition Modeling (FDM)

Το Fused Deposition Modeling (FDM) είναι μια τεχνολογία πολυεπίπεδης κατασκευής που παράγει αντικείμενα σύνθετης γεωμετρίας με την επίστρωση εξωθημένων υλικών σε υγρή μορφή, όπως πλαστικό ακρυλονιτρίλιο-βουταδιένιο-στυρόλιο (ABS). Το Fused Deposition Modeling (FDM) αναπτύχθηκε από τον S. Scott Crump στα τέλη Δεκαετία του 1980 και εμπορευματοποιήθηκε το 1990 από την Stratasys™. Με τη λήξη του το διπλώματος ευρεσιτεχνίας για αυτήν την τεχνολογία υπήρξε ένα ξέσπασμα της παγκόσμιας χρήσης αυτής τεχνολογίας (Wikipedia, n.d.). Η διαδικασία FDM χρησιμοποιεί δύο υλικά, ένα υλικό για την κατασκευή του τελικού προϊόντος και το άλλο υλικό για την κατασκευή των στηριγμάτων μιας χρήσης. Το υλικό παρέχεται από ένα ρολό πλαστικού νήματος σε καρούλι. Για να παραχθεί ένα αντικείμενο, το νήμα τροφοδοτείται σε μια κεφαλή εξώθησης ελεγχόμενης θερμοκρασίας και θερμαίνεται σε ημι-υγρή κατάσταση. Η κεφαλή εναποθέτει το υλικό σε εξαιρετικά λεπτές στρώσεις σε μια συνήθως θερμαινόμενη πλατφόρμα. Το αποτέλεσμα του

εναποθετιμένου και πλέον στερεοποιημένου υλικού που «πατά» στο προηγούμενο στρώμα υλικού είναι ένα τρισδιάστατο αντικείμενο που κατά το τέλος της εκτύπωσης θα αποτελεί το ολοκληρωμένο προϊόν. Το σύστημα λειτουργεί σε άξονες X, Y και Z, δημιουργώντας το αντικείμενο ένα στρώμα τη φορά.

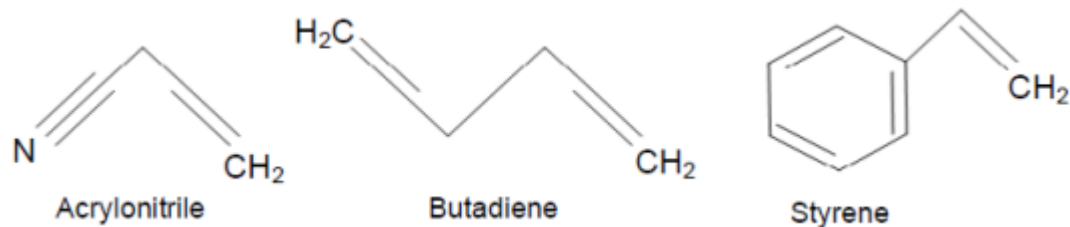
Η διαδικασία FDM ξεκινά με την εισαγωγή ενός αρχείου STL ενός μοντέλου σε ένα λογισμικό προεπεξεργασίας (Slicing Software). Μετά την εξέταση των δεδομένων διαδρομής και τη δημιουργία των διαδρομών της κεφαλής, τα δεδομένα αποστέλλονται στη μηχανή FDM. Αυτό το μοντέλο είναι προσανατολισμένο και κομμένο μαθηματικά σε οριζόντια στρώματα που ποικίλλουν από $\pm 0,127$ έως $0,254$ mm πάχος. Αν χρειάζεται, δημιουργούνται δομές στήριξης (Supports), με βάση τη θέση και τη γεωμετρία των εξαρτημάτων. Μόλις ολοκληρωθεί το εξάρτημα, το υλικό στήριξης αφαιρείται και το αντικείμενο έχει τελειώσει. Τα βασικά εξαρτήματα μιας μηχανής FDM είναι κινητήριος τροχός που χρησιμοποιούνται για την έλξη και καθοδήγηση του νήματος από το φύσιγγιο του μέσα στον θερμαντήρα, ένας θερμαντήρας και υγραποιητής για την τήξη του νήματος, ένα άκρο εξώθησης που χρησιμοποιείται για την εξώθηση του νήματος, μια πλατφόρμα για εναποθεθεί επάνω το νήμα σε ημι-υγρή κατάσταση και ένα έμβολο για να κινήσει την πλατφόρμα στον άξονα Z. Υπάρχει ένα δεύτερο ακροφύσιο εξώθησης για το υλικό στήριξης που λειτουργεί ξεχωριστά από το ακροφύσιο εξώθησης του υλικού που χρησιμοποιείται για το μοντέλο (Kumar P, 2012). Το όλο σύστημα περιέχεται στο θερμαινόμενο περιβάλλον ενός θαλάμου κλειστής αρχιτεκτονικής. Ο κλειστός θάλαμος βοηθάει το εξωθημένο υλικό να συνδεθεί σωστά με το προηγούμενο στρώμα του που διατηρείται σε ημιτηγμένη κατάσταση σε θερμοκρασία κοντά στη θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου του υλικού. Ένας άλλος λόγος είναι η μείωση της ποσότητας ενέργειας που απαιτείται για την τήξη του νήματος στο ακροφύσιο καθώς δεν έχουμε αυξημένη απώλεια θερμοκρασίας στο περιβάλλον. Το νήμα εξωθείται σε ημι-τηγμένη κατάσταση και σε λεπτή μορφή. Οι δομές στήριξης δημιουργούνται αυτόματα για προεξέχουσες γεωμετρίες και αργότερα αφαιρούνται είτε με τη χρήση καθαριστικού υπερήχων είτε με το σπάσιμο τους από το αντικείμενο. Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει μια σχηματική αναπαράσταση ενός FDM εκτυπωτή.



Εικόνα 62 Γραφική Αναπαράσταση της λειτουργίας ενός FDM εκτυπωτή. [\(πηγή\)](#)

Η συγκόλληση μεταξύ των επιμέρους στρώσεων του ίδιου στρώματος και των γειτονικών στρωμάτων καθοδηγείται από τη θερμική ενέργεια του ημι-λιωμένου υλικού και τη διάχυση. Η μηχανική συμπεριφορά των εξαρτημάτων FDM δεν ελέγχεται μόνο από το υλικό κατασκευής, αλλά επηρεάζεται και από τις επιλεγμένες παραμέτρους κατασκευής. Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας υποδηλώνει ότι η ποιότητα των εξαρτημάτων FDM σχετίζεται με την αντοχή του εξαρτήματος, την ποιότητα της επιφάνειας και την ακρίβεια των διαστάσεων. Η ποιότητα εξαρτάται από κύριους παράγοντες ελέγχου όπως το πάχος του στρώματος, η κατεύθυνση εναπόθεσης των στρώσεων νήματος, το πλάτος της στρώσης και το μέγεθος του κενού μεταξύ των στρώσεων (Kantaros A, 2013). Ένας αριθμός υλικών είναι διαθέσιμος για χρήση στην τεχνολογία FDM. Αυτά μπορεί να είναι το ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS), το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), το πολυανθρακικό (PC), το πολυαμίδιο (PA), το πολυστυρένιο (PS), το καουτσούκ, μεταξύ πολλών άλλων. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα υλικά είναι το ABS και το PLA. Το PLA προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές όπως το άμυλο καλαμποκιού ή το ζαχαροκάλαμο. Είναι φιλικό προς το περιβάλλον και βιοδιασπώμενο. Η σκληρότητά του κυμαίνεται μεταξύ $r70$ και $r90$ στην κλίμακα Rockwell Hardness και έχει σημείο τήξης περίπου $173\text{ }^{\circ}\text{C}$. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και να προσφέρει εξαιρετικά αποτελέσματα όσον αφορά την ακρίβεια του τελικού αντικειμένου. Παράλληλα, διαθέτει πλεονέκτημα όταν χρησιμοποιείται σε τεχνικές όπως η χύτευση μετάλλων λόγω του χαμηλού σημείου τήξης του. Το υλικό ABS αποτελεί μια θερμοπλαστική ένωση. Ένα εκτυπωμένο προϊόν από ABS έχει έως και το 80% της αντοχής ενός

χυτευμένου αντικειμένου ABS, που σημαίνει ότι είναι εξαιρετικά κατάλληλο για λειτουργικές εφαρμογές. Ωστόσο, δεν είναι τόσο φιλικό προς το περιβάλλον όσο το PLA, καθώς δεν είναι βιοαποικοδομήσιμο, παρόλο που έχει δυνατότητα να ανακυκλωθεί. Το πλεονέκτημα της χρήσης ABS είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τα τελικά στάδια της γρήγορης δημιουργίας πρωτοτύπων, όπως εξαρτήματα τελικής παραγωγής ή δείγματα μοντέλων. Έχει επίσης καλύτερα χαρακτηριστικά τριβής και αντοχής σε υψηλότερες θερμοκρασίες από το PLA. Το ακόλουθο σχήμα δείχνει τα μονομερή που συνθέτουν το πολυμερές ABS.



Εικόνα 63 Μονομερή που αποτελούν το ABS πολυμερές. [\(πηγή\)](#)

Κατά τη χρήση και των δύο υλικών, το ABS παρατηρείται ότι είναι πιο επιρρεπές σε ρωγμές και αποκόλληση, ενώ το PLA είναι πιο επιρρεπές σε κυρτώματα σε γωνίες και προεξοχές. Επιπλέον, το ABS διαθέτει μεγαλύτερη ευελιξία σε σύγκριση με το PLA. Τέλος, και τα δύο υλικά μπορούν να συνδεθούν χρησιμοποιώντας κόλλες, ωστόσο το ABS μπορεί επίσης να συνδεθεί με διαλύτες όπως η ακετόνη. Το ABS χρησιμοποιείται συχνότερα για τη βιομηχανία και τα τελικά εξαρτήματα, ενώ το PLA χρησιμοποιείται περισσότερο από σχολεία ή χομπίστες για μέτρια πρωτότυπα.

Οι υποκατηγορίες ABS που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη στην τεχνολογία FDM είναι οι ακόλουθες. Πρώτον, το ABSi είναι ένας τύπος ABS με υψηλή αντοχή σε κρούση. Το ημιδιαφανές υλικό που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των εξαρτημάτων FDM είναι εγκεκριμένο από την USP Class VI. Δεύτερον, το ABS-M30 είναι 25-75% ισχυρότερο από το τυπικό υλικό ABS και παρέχει ρεαλιστικά αποτελέσματα λειτουργικών δοκιμών μαζί με πιο λεία εξαρτήματα με καλύτερες λεπτομέρειες χαρακτηριστικών. Τρίτον, το ABS-ESD7 είναι ένα ανθεκτικό και ηλεκτροστατικό υλικό κατάλληλο για εξαρτήματα τελικής χρήσης, ηλεκτρονικά προϊόντα Βιομηχανικός εξοπλισμός και Jigs και εξαρτήματα για τη συναρμολόγηση ηλεκτρονικών. Τέλος, το PC-ABS είναι ένα μείγμα από πολυανθρακικό και πλαστικό ABS που συνδυάζει την αντοχή του PC με την ευελιξία του ABS. Ένα άλλο υλικό πολυάνθρακα είναι τα μείγματα PC-ISO που χρησιμοποιούνται ευρέως σε όλη την κατασκευή συσκευασιών και ιατρικών συσκευών. Το υλικό PC-ISO που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των εξαρτημάτων FDM είναι εγκεκριμένο από την Κλάση VI της USP και έχει επίσης βαθμολογία ISO 10993-1. Στην ομάδα των θερμοπλαστικών υλικών, το ULTEM 9085 είναι ένα προηγμένο θερμοπλαστικό που είναι ισχυρό, ελαφρύ και μη εύφλεκτο (ονομασία UL 94-V0). Το υλικό ULTEM 9085 ξεδιπλώνει νέες ικανότητες για την άμεση προσθετική κατασκευή εξαρτημάτων ποιότητας παραγωγής (Materialise NV, 2015).



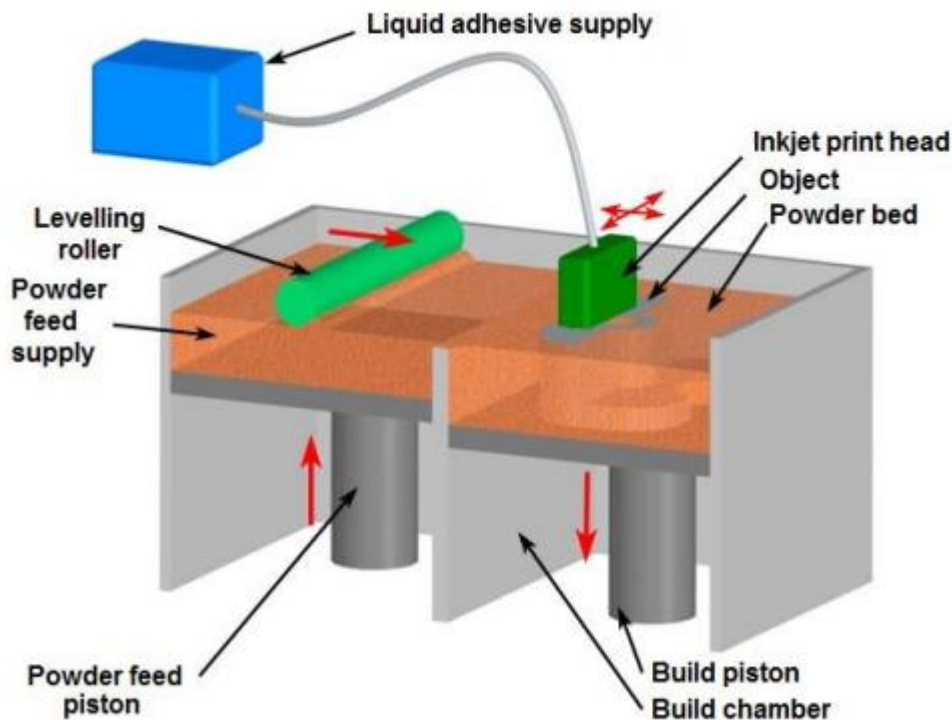
Εικόνα 64 3D Εκτυπωτής τεχνολογίας FDM.

3.2.4. Τρισδιάστατη εκτύπωση/Three Dimensional Printing (3DP)

Η τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μια διαδικασία που αναπτύχθηκε στο Ινστιτούτο Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (MIT), ΗΠΑ. Όπως και άλλες τεχνικές AM, περιλαμβάνει την ταχεία και ευέλικτη παραγωγή πρωτότυπων εξαρτημάτων, εξαρτημάτων τελικής χρήσης και εργαλείων απευθείας από ένα μοντέλο CAD. Διαθέτοντας υψηλό βαθμό ευελιξίας, μπορεί να δημιουργήσει αντικείμενα οποιασδήποτε γεωμετρίας και από οποιοδήποτε υλικό, συμπεριλαμβανομένων κεραμικών, μετάλλων, πολυμερών και σύνθετων υλικών. Ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής είναι ένα εργαλείο για άμεση ψηφιακή κατασκευή που εκτυπώνει επιλεκτικά ένα ημι-υγρό συνδετικό υλικό σε ένα στρώμα χαλαρής σκόνης για να σχηματίσει ένα «πράσινο» τμήμα του οποίου το σχήμα δίνεται από τις προδιαγραφές CAD. Ενώ ένα σημαντικό πλεονέκτημα του 3DP είναι η ευρεία γκάμα δυνητικά κατάλληλων υλικών, η δημιουργία ενός συγκεκριμένου προφίλ του 3DP για έναν νέο συνδυασμό υλικών απαιτεί μια σειρά βημάτων. Πρώτον, η σύνθεση μιας σκόνης, δεύτερον η επιλογή μιας μεθόδου δέσμευσης και τρίτον η σύνθεση του υγρού συνδετικού. Το τελευταίο απαιτεί δοκιμή συμβατότητας για την αλληλεπίδραση της σκόνης εκτύπωσης. Το προφίλ της διαδικασίας εκτύπωσης πρέπει να καθορίζονται μαζί με τις διαδικασίες μετά την επεξεργασία (B. & et.al., 2008).

Η Τρισδιάστατη Εκτύπωση λειτουργεί με την εναπόθεση στρώμα προς στρώμα. Κάθε στρώμα ξεκινά με μια λεπτή κατανομή σκόνης που απλώνεται στην επιφάνεια ενός στρώματος πούδρας. Χρησιμοποιώντας μια τεχνολογία παρόμοια με την εκτύπωση με έγχυση μελάνης, ένα συνδετικό υλικό ενώνει επιλεκτικά σωματίδια σε προκαθορισμένα σημεία όπου πρόκειται να σχηματιστεί το

αντικείμενο. Ένα έμβολο που στηρίζει την κλίνη σκόνης και το δομικό αντικείμενο χαμηλώνει έτσι ώστε το επόμενο στρώμα σκόνης να μπορεί να απλωθεί και να ενωθεί επιλεκτικά. Αυτή η διαδικασία στρώμα προς στρώμα συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση του πλήρους αντικειμένου. Μετά από θερμική επεξεργασία, η μη δεσμευμένη σκόνη αφαιρείται, με αποτέλεσμα το τελικό κατασκευασμένο αντικείμενο (3DP™ Laboratory, MIT, 1998-2000). Το ακόλουθο σχήμα απεικονίζει μια σχηματική αναπαράσταση μιας μηχανής 3DP.

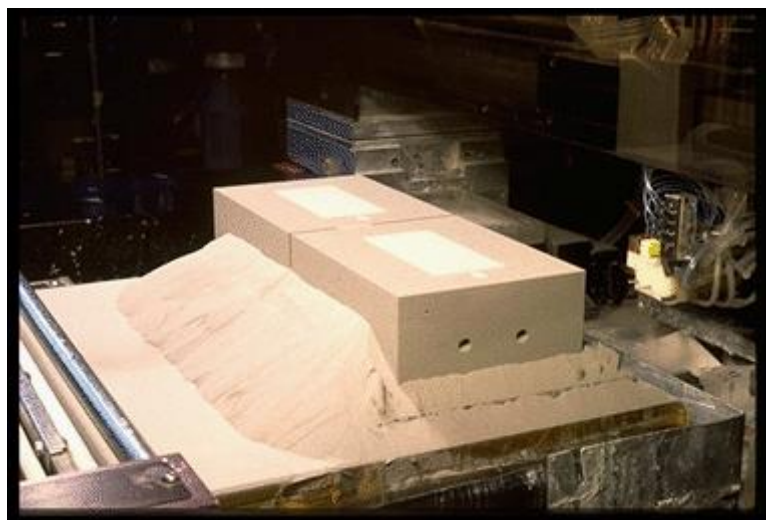


Εικόνα 65 Αναπαράσταση λειτουργίας ενός εκτυπωτή τριών διαστάσεων. (πηγή)

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έχει μια σειρά από πλεονεκτήματα. Για όλες τις τεχνολογίες εκτύπωσης που βασίζονται σε σκόνη, η πριν και μετά επεξεργασία μπορεί να παραμένουν ίδιες, αλλά το 3DP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία σχημάτων που είναι δύσκολο ή αδύνατο να δημιουργηθούν με παραδοσιακές τεχνικές. Τα βήματα θερμικής μετεπεξεργασίας για κεραμικά και μέταλλα είναι παρόμοια με εκείνα στις παραδοσιακές μεθόδους που βασίζονται σε σκόνη και απαιτούν λιγότερο πειραματισμό βελτιστοποίησης σε σύγκριση με την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ (SLS) και την επιλεκτική τήξη με λέιζερ (SLM). Ωστόσο, το μειονέκτημα του 3DP είναι ότι τα εξαρτήματα απαιτούν μεταγενέστερη επεξεργασία και τυπικά παρουσιάζουν πόρους στην τελική υφή (ακόμη και μετά την αρχική θερμική επεξεργασία), ενώ τα προϊόντα από SLS και SLM βγαίνουν από το μηχάνημα πλήρως πυκνά ή ήδη πυροσυσσωματωμένα, αντίστοιχα. Εκτός από την ευελιξία κατασκευής του 3DP, αυτές οι προσαρμοστικές ικανότητες του, το καθιστούν ένα ισχυρό εργαλείο για την τροποποίηση των παραδοσιακών διαδικασιών κατασκευής, σε σύγκριση με μια πλήρη επανεφεύρεση της διαδικασίας που απαιτείται για νέα υλικά σε άλλα συστήματα AM (B. & et.al., 2008).

Ένας ορισμός που πρέπει να αναφερθεί για τον όρο «3D-Printing». Ο ορισμός της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι κάπως ανακριβής. Ενώ ορισμένοι ειδικοί στον τομέα θα περιόριζαν

την τρισδιάστατη εκτύπωση σε μονάδες με κεφαλές εκτύπωσης με βάση inkjet που δημιουργούν ένα αντικείμενο με βάση την λογική εκτύπωσης στρώμα-στρώμα, άλλοι θα εφάρμοζαν αυτόν τον όρο σε εκδόσεις μηχανών γραφείου ή καταναλωτή ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων που είναι σχετικά χαμηλές σε κόστος και εύκολες στη χρήση (Casey, 2009). Ως εκ τούτου, πολλά μηχανήματα ανοιχτής αρχιτεκτονικής που λειτουργούν σύμφωνα με τις αρχές της τεχνολογίας FDM και χρησιμοποιούν κυρίως ABS ή PLA ως πρώτες ύλες χαρακτηρίζονται ως τρισδιάστατοι εκτυπωτές. Αυτή η ταξινόμηση χρησιμοποιείται συχνά και για μεγαλύτερες μηχανές FDM κλειστής αρχιτεκτονικής. Τέτοια εμπορικά διαθέσιμα μηχανήματα αξίας από 10.000 \$ έως 100.000 \$ υπάγονται σε αυτήν την ταξινόμηση (Berman, 2012). Λόγω του γεγονότος ότι στην πειραματική εργασία της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιούνται τέτοιες μηχανές ταχείας προτυποποίησης, ο όρος «3D-Printing» θα χρησιμοποιείται από αυτό το σημείο και μετά όταν γίνεται αναφορά σε αυτές.

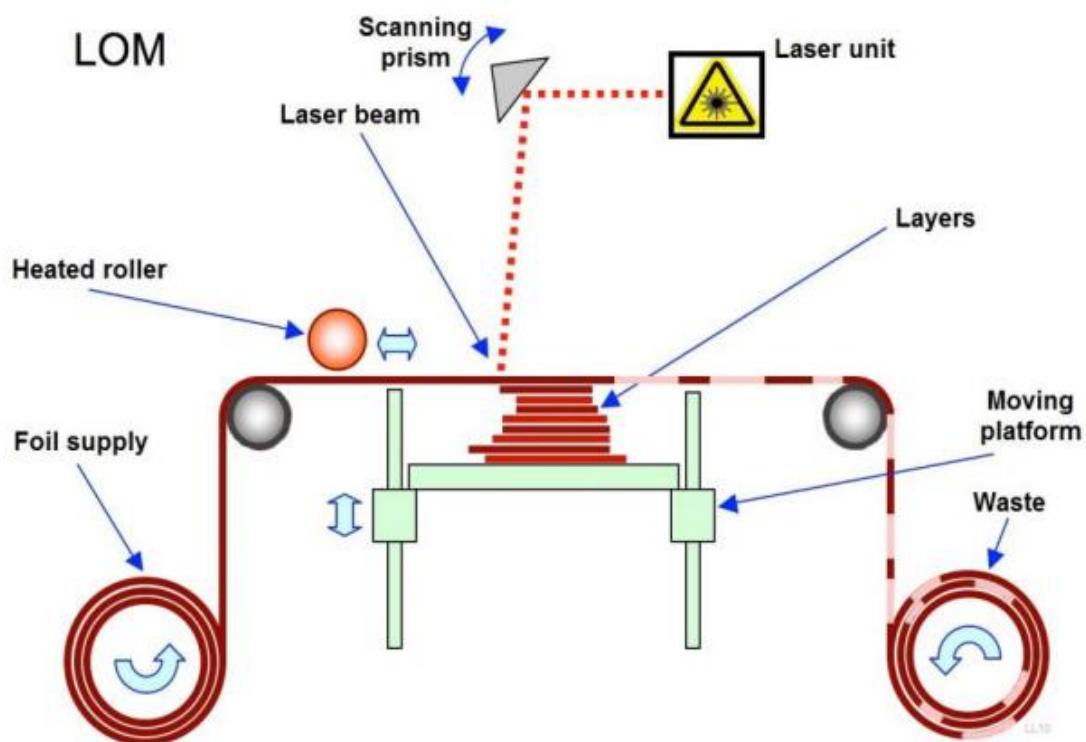


Εικόνα 66 Εκτυπωτής τριών διαστάσεων, φωτογραφία από πρότυπο μηχάνημα του M.I.T. [\(πηγή\)](#)

3.2.5. Κατασκευή πολυστρωματικών αντικειμένων/Laminated Object Manufacturing (LOM)

Η κατασκευή πολυστρωματικών αντικειμένων (LOM) είναι μια τεχνική ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων που αναπτύχθηκε από την Helisys Inc. Στρώματα από φύλλα χαρτιού, πλαστικού ή μετάλλου επικαλυμμένα με κόλλα κολλώνται μεταξύ τους και κόβονται σε σχήμα με μαχαίρι ή κόφτη λέιζερ. Μπορεί να θεωρηθεί ως μια υβριδική μέθοδος μεταξύ αφαιρετικών και προσθετικών διεργασιών. Τα Προϊόντα είναι πράγματι δομημένα με την προσέγγιση στρώμα προς στρώμα, η οποία αποτελεί χαρακτηριστικό των προσθετικών διεργασιών, αλλά κάθε στρώμα κόβεται ξεχωριστά από ένα ειδικό εργαλείο στο σχήμα της διατομής του προϊόντος που αποτελεί τεχνική που παρατηρούμε στις αφαιρετικές διεργασίες. Κάθε στρώμα είναι κολλημένο στο προηγούμενο με μια κολλητική επίστρωση που ενεργοποιείται από μια θερμαινόμενη πλάκα ή κύλινδρο κατά τη διαδικασία της LOM (L. & et.al, 2004). Τα αντικείμενα που εκτυπώνονται με αυτή τη μέθοδο μπορούν να τροποποιηθούν περαιτέρω με μηχανική κατεργασία ή διάτρηση μετά την εκτύπωση (CNC). Η τυπική ανάλυση στρώματος για αυτήν την τεχνική ορίζεται από την πρώτη ύλη του υλικού και κυμαίνεται σε πάχος από ένα έως μερικά φύλλα χαρτιού.

Η διαδικασία κατασκευής ξεκινά με την πλαστικοποίηση 20 στρώσεων χαρτιού στην πλατφόρμα. Οι στρώσεις λειτουργούν ως στήριγμα μιας χρήσης για το προς κατασκευή τμήμα. Το χαρτί έχει μια θερμικά ενεργοποιήσιμη αυτοκόλλητη επίστρωση στην κάτω πλευρά του και η πλαστικοποίηση πραγματοποιείται με θερμαινόμενο κύλινδρο από ανοξείδωτο χάλυβα. Ο κύλινδρος παρέχει επαρκή πίεση για να φέρει το νέο στρώμα σε επαφή με τα στρώματα που έχουν ήδη αποθεθεί και την απαιτούμενη θερμότητα για να προκαλέσει επαρκή συγκόλληση. Κάθε στρώμα κόβεται με δέσμη λέιζερ CO₂ σε μια διατομή που καθορίζεται από το αρχείο CAD. Το λέιζερ κόβει επίσης το περισσευούμενο υλικό σε μοτίβο διασταύρωσης ώστε να είναι εύκολο να αφαιρεθεί. Επιπλέον, το περισσευούμενο υλικό παρέχει υποστήριξη για τις επόμενες στρώσεις. Τέλος, κόβεται ένα ορθογώνιο περίγραμμα που αποσπά τη διατομή από το ρολό χαρτιού. Η πλατφόρμα κινείται προς τα κάτω και το χαρτί τροφοδοσίας προχωρά. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί η τελική στρώση. Το περισσευούμενο υλικό που έχει ήδη τεμαχιστεί, αφαιρείται με το χέρι στο τέλος της διαδικασίας (Park J, 2000). Η ακόλουθη εικόνα απεικονίζει μια σχηματική αναπαράσταση μιας μηχανής LOM.



Εικόνα 67 Αναπαράσταση λειτουργίας 3D Εκτυπωτή τεχνολογίας L.O.M. [\(πηγή\)](#)

Διάφορα πλεονεκτήματα προκύπτουν από τη διαδικασία LOM σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες AM. Οι πολύ χαμηλές εσωτερικές τάσεις των εξαρτημάτων LOM αποτρέπουν τη συρρίκνωση και την παραμόρφωση, κοινά προβλήματα μεταξύ άλλων μεθόδων AM. Επιπλέον, τα κατασκευασμένα αντικείμενα έχουν υψηλή αντοχή, χαμηλή ευθραυστότητα και ψαθυρότητα. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι η δυνατότητα κατασκευής πολύ μεγάλων εξαρτημάτων με τη διαδικασία LOM (500×800×500 mm) (20×30×20 in.), η οποία είναι ένας τρέχων περιορισμός άλλων τεχνικών AM. Τα μέρη LOM κατασκευασμένα από χαρτί έχουν ιδιότητες συγκρίσιμες με το κόντρα πλακέ ξύλο, ένα

τυπικό υλικό κατασκευής σχεδίων. Επιπλέον, διάφορα οργανικά και ανόργανα υλικά με διαφορετικές χημικές και μηχανικές ιδιότητες για μια ολόκληρη ποικιλία εφαρμογών μπορούν να υποβληθούν σε επεξεργασία παρέχοντας στους χρήστες LOM εκτεταμένη δυνατότητα επιλογής υλικού. Τα υλικά LOM είναι μη τοξικά και μη αντιδραστικά, επομένως είναι εύκολο να χειριστούν και να απορριφθούν. Επίσης, το κόστος υλικών και των μηχανών διεργασιών είναι χαμηλότερο σε σχέση με άλλα συστήματα AM με αποτέλεσμα γενικότερα χαμηλότερο κόστος παραγωγής (Mueller B, 1999).

Ωστόσο, η τεχνική LOM έχει επίσης ορισμένα μειονεκτήματα. Το LOM δεν είναι ιδανικό για τη δημιουργία αντικειμένων με πολύπλοκες γεωμετρίες λόγω της αδυναμίας δημιουργίας κούφινων αντικειμένων. Ο καθαρισμός, το φινίρισμα και το σφράγισμα των τελικών κατασκευασμένων αντικειμένων είναι κουραστικό. Επιπλέον, ο έλεγχος της ακρίβειας των αντικειμένων στη διάσταση είναι σχετικά περίπλοκος για χάρτινα αντικείμενα LOM λόγω των φαινομένων διόγκωσης που παρατηρείται στον άξονα Z. Επιπλέον, η ακρίβεια του κατασκευασμένου αντικειμένου είναι περιορισμένη λόγω ενός απλούστερου σχεδιασμού μηχανής, σε σύγκριση με άλλες τεχνικές AM. Ένα άλλο ζήτημα είναι ότι οι μηχανικές και θερμικές ιδιότητες του υλικού είναι ανομοιογενείς λόγω της πολυστρωματικής δομής του βασικού υλικού και της κόλλας και η λεπτομέρεια αναπαραγωγής και αντοχής των μικρών εξαρτημάτων είναι χαμηλή (Mueller B, 1999).

Έτσι, η δυνατότητα της τεχνολογίας LOM μπορεί να εφαρμοστεί καλύτερα σε μεγάλα, συμπαγή μοντέλα με χαμηλής πολυπλοκότητας γεωμετρία, χωρίς πολλές λεπτές λεπτομέρειες και κούφιες κοιλότητες. Τα μοντέλα LOM μπορούν να εφαρμοστούν σε όλες τις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται παραδοσιακά ξύλινα σχέδια. Η εφαρμογή των μοντέλων LOM είναι οικονομικά εφικτή όχι μόνο για μοντέλα σχεδιασμού σε λογικές τιμές, αλλά και για τη δημιουργία πρωτοτύπων και εργαλείων και ενθέτων εργαλείων για χύτευση (ταχεία επεξεργασία) και για σχέδια χύτευσης (ταχεία δημιουργία σχεδίων).

Στον τομέα της χύτευσης και της επεξεργασίας πλαστικών, τα μοντέλα LOM μπορούν να λειτουργήσουν ως κύρια σχέδια για καλούπι πυριτίου σε διαδικασίες όπως χύτευση υπό κενό, έγχυση και χύτευση με εμφύσηση. Κατά την διαδικασία του καλουπιού, τα μέρη LOM μπορούν να παίξουν το ρόλο των σχεδίων στη χύτευση με έγχυση άμμου και κεριού στις διαδικασίες χύτευσης άμμου και επένδυσης. Μπορούν επίσης να χρησιμεύσουν ως κύρια σχέδια για καλούπι γύψου σε διαδικασίες χύτευσης με έγχυση χαμηλής πίεσης στη βιομηχανία κεραμικών. Στον τομέα της Αρχιτεκτονικής/ Πολιτικής Μηχανικής, τα μοντέλα LOM χρησιμοποιούνται ως αντικείμενα επίδειξης/διαφημιστικά που χρησιμεύουν ως μακέτες ή αναπαριστούν γλυπτά, προσόψεις κ.λπ. (Mueller B, 1999).



Εικόνα 68 3D Εκτυπωτής τεχνολογίας L.O.M. [\(πηγή\)](#)

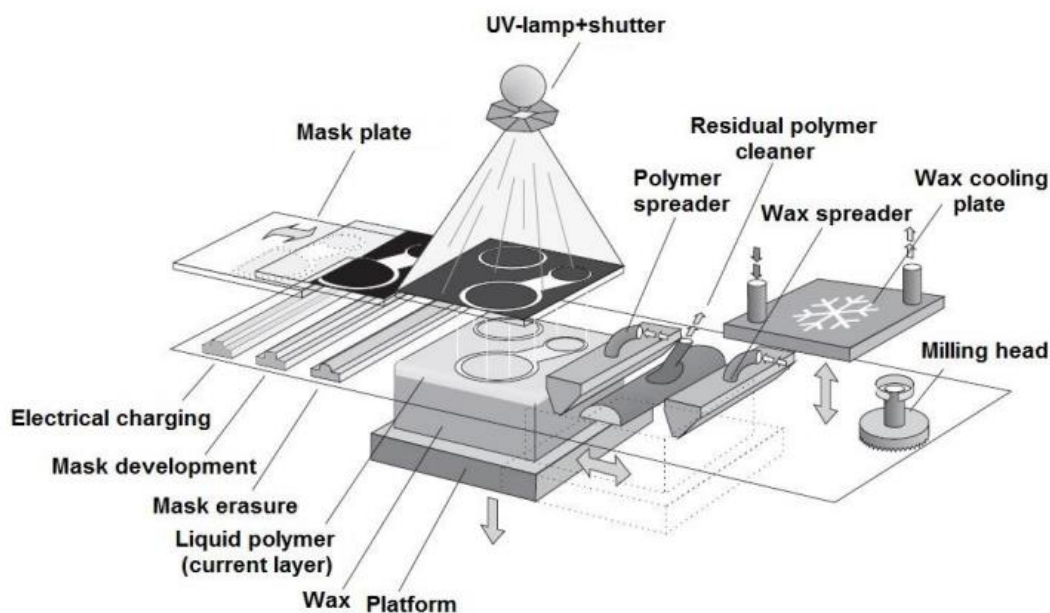
3.2.6. Solid Ground Curing (SGC)

Το SGC είναι μια διαδικασία που αναπτύχθηκε από την Cubital Inc. του Ισραήλ το 1986. Είναι μια τεχνολογία προσθετικής κατασκευής με βάση τα Φωτοπολυμερείς και χρησιμοποιείται για την παραγωγή μοντέλων, πρωτοτύπων, μοτίβων και εξαρτημάτων παραγωγής. Η κατασκευή κάθε στρώσης πραγματοποιείται με χρήση λάμπας UV με την χρήση ιδιού φίλμ. Το SGC χρησιμοποιεί φωτοευαίσθητο υγρό και έχει την λογική της τεχνικής στρώμα προς στρώμα. Ωστόσο, η κύρια διαφορά του είναι ότι εκθέτει ένα ολόκληρο στρώμα ταυτόχρονα στην UV ακτινοβολία. Πριν από την έναρξη της διαδικασίας, πρέπει να εκτυπωθεί μια σειρά πλακών. Το λογισμικό τεμαχίζει εικονικά το μοντέλο CAD σε λεπτές στρώσεις και κάθε στρώμα εκτυπώνεται (2-διάστατα) σε ένα πιάτο. Η πλάκα λειτουργεί ως μάσκα και η διατομή οποιουδήποτε μοντέλου είναι διαφανής ενώ η υπόλοιπη πλάκα είναι αδιαφανής (Stetz, 2009).

Η τεχνολογία SGC λειτουργεί υπό την αρχή της σκλήρυνσης των φωτοπολυμερών με πλήρη φωτισμό και σκλήρυνση ολόκληρης της επιφάνειας, χρησιμοποιώντας ειδικά παρασκευασμένες μάσκες (Engineers Handbook, 2004-2006). Αντί για σάρωση με λέιζερ, κάθε στρώμα του αντικειμένου ωριμάζει με έκθεση σε μια λάμπα υπεριώδους (UV). Με αυτόν τον τρόπο, κάθε τμήμα μιας στρώσης ωριμάζει ταυτόχρονα και δεν απαιτεί διαδικασία ακόλουθης επεξεργασίας με περαιτέρω έκθεση στην υπεριώδη ακτινοβολία.

Η διαδικασία περιέχει τα ακόλουθα βήματα. Αρχικά, η διατομή κάθε στρώσης υπολογίζεται με βάση το γεωμετρικό μοντέλο του εξαρτήματος και το επιθυμητό πάχος στρώσης. Στη συνέχεια, δημιουργείται η οπτική μάσκα σύμφωνα με κάθε διατομή. Μετά την ευθυγράμμιση, η πλατφόρμα καλύπτεται με ένα λεπτό στρώμα υγρού φωτοπολυμερούς. Σε αυτό το σημείο, η μάσκα που αντιστοιχεί στο τρέχον στρώμα τοποθετείται πάνω από την επιφάνεια της υγρής ρητίνης και η ρητίνη

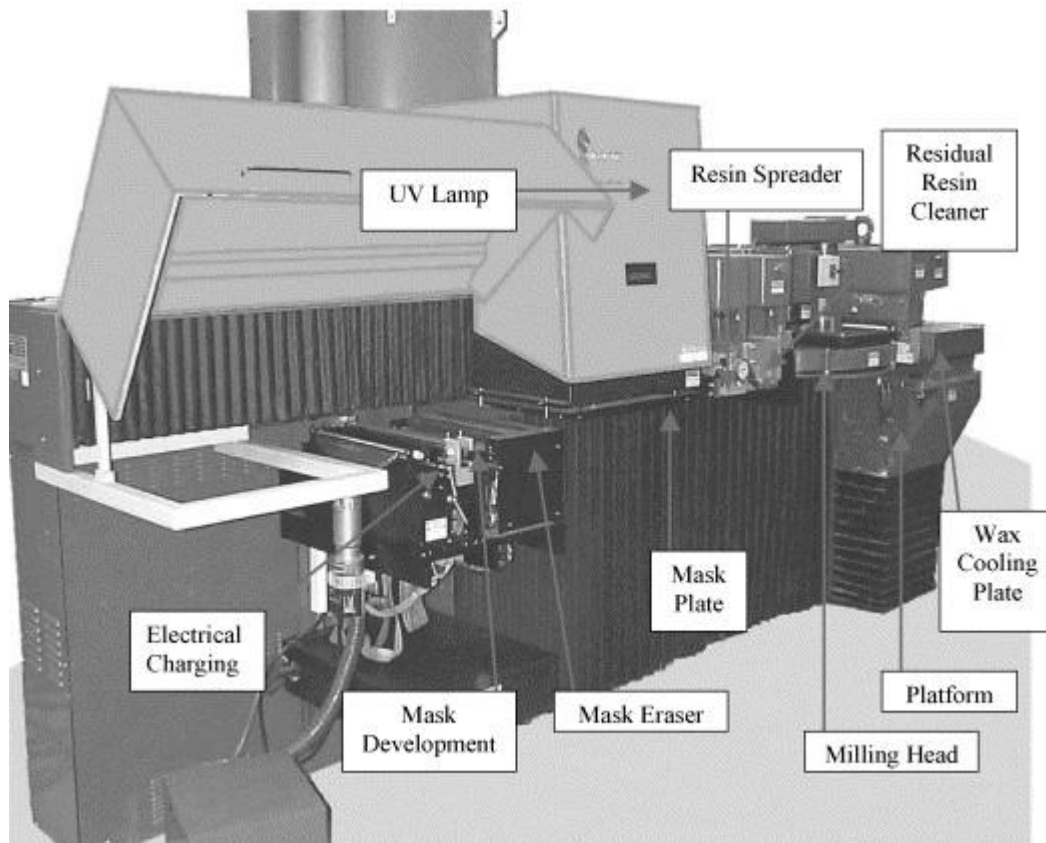
εκτίθεται σε μια λάμπα UV υψηλής ισχύος. Στη συνέχεια, το υπολειμματικό υγρό αφαιρείται από το κατασκευασμένο αντικείμενο χρησιμοποιώντας έναν αεροδυναμικό υαλοκαθαριστήρα. Στη συνέχεια, ένα στρώμα λιωμένου κεριού απλώνεται πάνω στο αντικείμενο για να γεμίσει πιθανά κενά. Το κεριό έπειτα στερεοποιείται εφαρμόζοντας μια ψυχρή πλάκα σε αυτό και η επιφάνεια του στρώματος κόβεται στο επιθυμητό πάχος με ένα δίσκο άλεσης. Στο τέλος, το κεριό λιώνει με την ολοκλήρωση του τμήματος (Wikipedia, 2022). Το ακόλουθο σχήμα δείχνει μια σχηματική αναπαράσταση μιας μηχανής SGC.



Εικόνα 69 Σχεδιάγραμμα στοιχείων ενός 3D Εκτυπωτή Τεχνολογίας SGC (πηγή)

Η ποιότητα του προϊόντος ενός SGC επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, ενώ μπορεί να υπάρχουν περίπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών. Για παράδειγμα, το πάχος του στρώματος παρουσιάζει επιπτώσεις στην ποιότητα της επιφάνειας στις κατευθύνσεις x και y . Οι χρόνοι έκθεσης επηρεάζουν τη διαδικασία σκλήρυνσης της ρητίνης, η οποία στη συνέχεια επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες των προϊόντων. Η ταχύτητα της βάσης «κρεβάτι» μπορεί να επηρεάσει τόσο την ποιότητα της επιφάνειας όσο και τις ιδιότητες του προϊόντος. Ο χρόνος ψύξης και η θερμοκρασία μπορεί επίσης να συμβάλλουν στην ποιότητα (P. & et.al., 2001).

Το πρωταρχικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας SGC είναι η έλλειψη δομών στήριξης (Supports), καθώς χρησιμοποιείται κεριό για την συμπλήρωση των κενών. Το μοντέλο που παράγεται από τη διαδικασία είναι αρκετά ακριβές στην κατεύθυνση z , επειδή το στρώμα αλέθεται μετά από κάθε βήμα έκθεσης στο φως. Αν και προσφέρει καλή ακρίβεια σε συνδυασμό με υψηλή απόδοση, παράγει πάρα πολλά απόβλητα και το κόστος λειτουργίας του είναι συγκριτικά υψηλό λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος (Wikipedia, 2022).



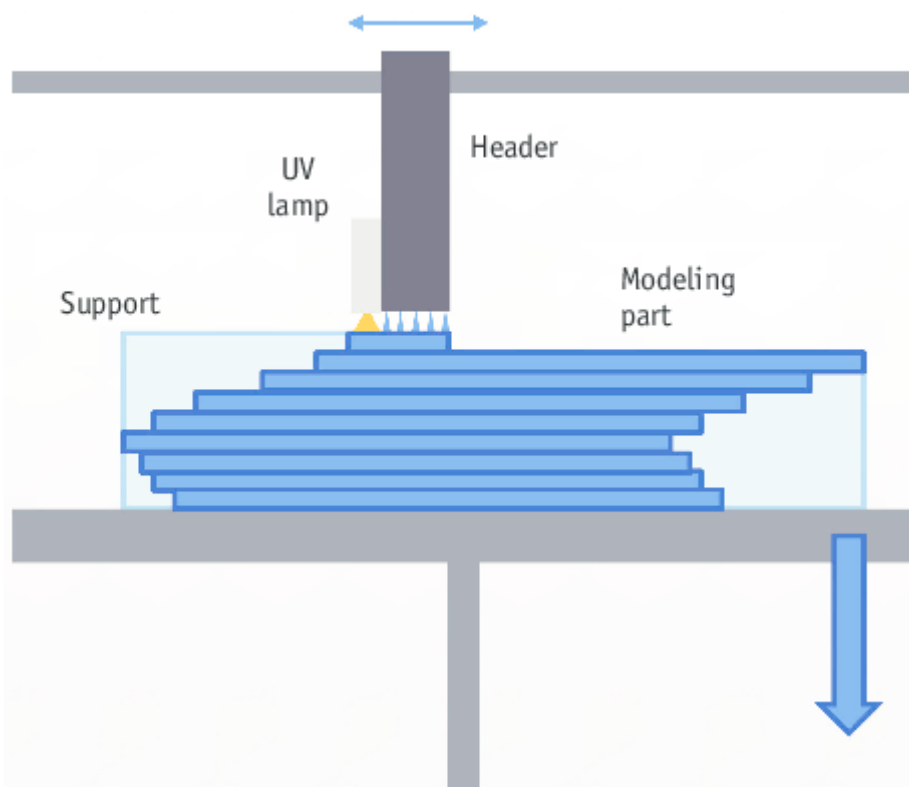
Εικόνα 70 3D Εκτυπωτής Τεχνολογίας SGC [\(πηγή\)](#)

3.2.7. Multi Jet Modelling (MJM)

Η μέθοδος προσθετικής κατασκευής ή μέθοδος τρισδιάστατης εκτύπωσης, γνωστή ως Multi-Jet Modeling (MJM) χρησιμοποιεί στρώματα φωτοπολυμερούς που τοποθετούνται το ένα πάνω στο άλλο και σκληρύνονται με υπεριώδη ακτινοβολία. Αυτή η μέθοδος είναι επίσης γνωστή ως μέθοδος Inkjet ή Polyjet. Η Objet-Geometries ανέπτυξε τον πρώτο τρισδιάστατο εκτυπωτή που εκτόξευε σταγονίδια φωτοπολυμερούς και τα θεράπευσε με υπεριώδη ακτινοβολία το 2000. Ανέλαβαν την ανάπτυξη της τεχνολογίας, την οποία ονόμασαν PolyJet, και κατείχε πολλές πατέντες. Αυτός είναι ο λόγος που η διαδικασία έχει πολλά ονόματα. Η τεχνολογία Multijet είναι γνωστή για την ικανότητά της να δημιουργεί αντικείμενα με λεπτές λεπτομέρειες. Κατά τη διαδικασία εκτύπωσης, το τρισδιάστατο αντικείμενο κατασκευάζεται στρώμα προς στρώμα χρησιμοποιώντας μια κεφαλή εκτύπωσης. Το Multi-Jet Modeling καθιστά δυνατή τη δημιουργία αντικειμένων πλούσια σε λεπτομέρεια με λεία επιφάνεια. Ο τρόπος λειτουργίας του είναι παρόμοιος με έναν συμβατικό εκτυπωτή inkjet.

Οι εκτυπωτές Multijet αποτελούνται από ένα δοχείο υλικού, μια πλατφόρμα κατασκευής (κρεβάτι) και ένα φορέα στο οποίο είναι τοποθετημένα φώτα UV και κεφαλές εκτύπωσης εκτόξευσης. Πριν ξεκινήσει η διαδικασία εκτύπωσης, η φωτοπολυμερής ρητίνη πρέπει να χυθεί στο δοχείο υλικού και να θερμανθεί, επιτρέποντας στην ουσία να φτάσει στο επιθυμητό ιξώδες. Η διαδικασία εκτύπωσης ξεκινά με το φορέα να κινείται κατά μήκος του άξονα X, κατά μήκος της πλατφόρμας κατασκευής. Καθώς κινείται, οι κεφαλές εκτύπωσης εκτοξεύουν επιλεκτικά τη ρητίνη, με τη μορφή σταγονιδίων, στην πλατφόρμα κατασκευής. Αμέσως μετά την εκτόξευσή τους, οι λυχνίες UV τις ωριμάζουν σε ένα συνεχώς αναπτυσσόμενο στερεό. Τουλάχιστον δύο κεφαλές εκτύπωσης χρησιμοποιούνται για την εκτύπωση, έτσι ώστε να μπορούν να ενσωματωθούν επιπλέον στοιχεία

στήριξης. Το αποτέλεσμα αυτού είναι ότι προεξοχές στο αντικείμενο μπορούν να δημιουργηθούν χωρίς πρόβλημα. Τα στρώματα του τυπωμένου αντικειμένου προστίθενται σταδιακά και τα δομικά παράλληλα με τα υποστηρικτικά υλικά που δρουν ως στηρίγματα. Το υποστηρικτικό υλικό, το οποίο περιβάλλει και προστατεύει το μοντέλο κατά τη διαδικασία εκτύπωσης, περνάει από διαφορετικές διαδικασίες αργότερα, είτε αφαιρείται με πίδακα νερού είτε διαλύεται σε νερό. Οι δομές στήριξης μπορούν επίσης να είναι κατασκευασμένες από κεριά χαμηλότερης τήξης και μπορούν να αφαιρεθούν στη συνέχεια με θέρμανση. Τα τελικά μοντέλα μπορούν να υποστούν γρήγορη επεξεργασία (π.χ. CNC), να κολληθούν ή να επικαλυφθούν (για παράδειγμα, επιμετάλλωση υπό κενό). Καθώς υπάρχουν πολλές κεφαλές εκτύπωσης, διαφορετικά υλικά μπορούν να εκτυπωθούν ταυτόχρονα. Ένα παράδειγμα εφαρμογής αυτής της λειτουργικότητας είναι ένα τμήμα που απαιτεί στηρίγματα, όπου το υλικό στήριξης εκτυπώνεται ταυτόχρονα με το κύριο υλικό. Λόγω της μεθόδου στρώσης, ποικίλα εξαρτήματα μπορούν να κατασκευαστούν το ένα μέσα στο άλλο ακόμη και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εκτύπωσης. Δεν έχει σημασία αν τα υλικά διαφέρουν μεταξύ τους αισθητικά, φυσικά ή οπτικά, μπορούν ακόμα να εκτυπωθούν ταυτόχρονα χρησιμοποιώντας το MJM. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται κυρίως για τη δημιουργία πρωτοτύπων, ή όπως υποδηλώνει το όνομα, τη μοντελοποίηση, ιδιαίτερα για μοντέλα ή πρωτότυπα που απαιτούν περισσότερα από ένα υλικά ή είναι ευαίσθητα με λεπτά τοιχώματα και ακριβή σχέδια. Η διαδικασία χρησιμοποιείται συχνά στην ιατρική και οδοντιατρική βιομηχανία. Στην ακόλουθη εικόνα παρατηρούμε την διαδικασία εκτύπωσης σε έναν εκτυπωτή τεχνολογίας MJM.

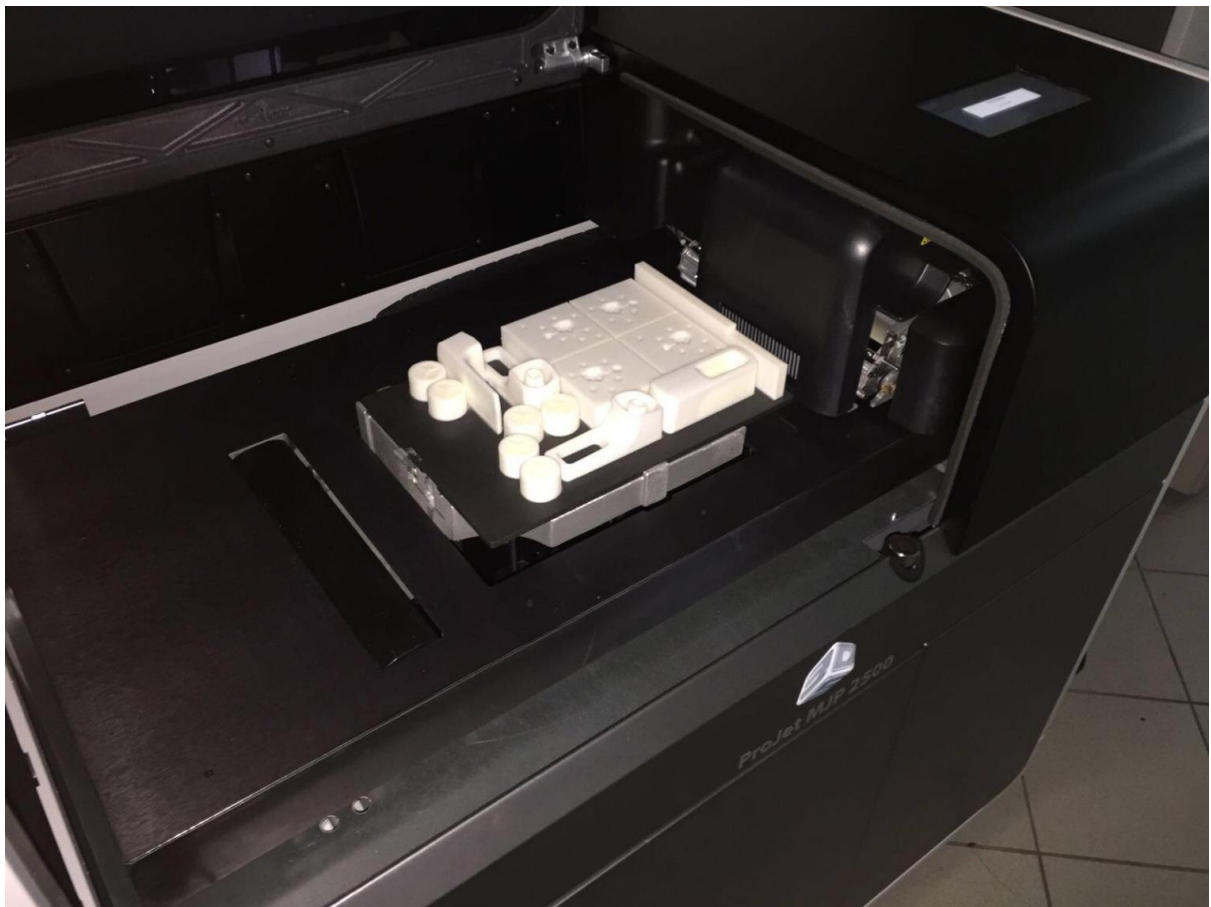


Εικόνα 71 Γραφική αναπαράσταση της διαδικασίας εκτύπωσης στην τεχνολογία MJM [\(πηγή\)](#)

Το πλεονέκτημα του Multi Jet Modeling είναι ότι, ανάλογα με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται, μπορούν να αναμιχθούν διαφορετικά υλικά στο ακροφύσιο, έτσι ώστε να μπορούν να επιτευχθούν εντελώς διαφορετικές χρωματικές αποχρώσεις ή βαθμοί σκληρότητας για

εξαρτήματα, τα οποία μπορούν να βαφτούν, να κοπούν ή να λειανθούν στη διαδικασία φινιρίσματος. Τα μοντέλα της MJM έχουν υψηλή ακρίβεια και υψηλό επίπεδο λεπτομέρειας με λεπτές δομές. Δεν υπάρχουν υπολείμματα πολυμερούς στα μοντέλα και πρέπει να αφαιρεθεί μόνο το υλικό στήριξης. Χάρη στα ακριβή σχήματα που μπορούν να δημιουργηθούν, οι σχεδιαστές μπορούν εύλογα να πειραματιστούν, να δοκιμάσουν πρωτοποριακά σχέδια και να εντοπίσουν πιθανά σφάλματα ή αδύναμα σημεία σε πρώιμο στάδιο. Αυτό σημαίνει μεγάλη αύξηση της αποτελεσματικότητας για τη διαδικασία ανάπτυξης του προϊόντος και μικρότερους χρόνους μέχρι την κυκλοφορία στην αγορά. Μια άλλη δημοφιλής εφαρμογή όπου η εξοικονόμηση χρόνου διαδραματίζει επίσης καθοριστικό ρόλο είναι η αποτελεσματική παραγωγή βασικών μοντέλων για γεωμετρικά ακριβή χύτευση.

Κοιτώντας τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας παρατηρούμε πώς τα μοντέλα της MJM έχουν κακές μηχανικές ιδιότητες και κατά συνέπεια δεν είναι κατάλληλα για λειτουργικά πρωτότυπα. Τείνουν να έχουν χαμηλότερη αντοχή στη θερμοκρασία και τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι ελαφρώς πιο εύθραυστα και δεν είναι ανθεκτικά στην υπεριώδη ακτινοβολία, επομένως είναι δυνατή η ευθραυστότητα και ο αποχρωματισμός. Υπάρχουν επίσης περιορισμοί στη γεωμετρική ελευθερία αφού το υλικό στήριξης πρέπει να είναι αφαιρούμενο. Έχουν επίσης υψηλό κόστος υλικών σε σύγκριση με άλλες διαδικασίες τρισδιάστατης εκτύπωσης και περιορισμένη ποικιλία υλικών. Τέλος, οι αιχμηρές άκρες των μοντέλων είναι συχνά ελαφρώς στρογγυλεμένες. (Thomas Supplier Discovery, 2022)



Εικόνα 72 3D Εκτυπωτής τεχνολογίας MJM [\(πηγή\)](#)

4. Πειραματικό μέρος.

4.1. Διαδικασία Ψηφιοποίησης γυάλινου αγγείου.

4.1.1. Τρισδιάστατος σαρωτής του Πειράματος.

Στα πλαίσια της εργασίας, για το πειραματικό μέρος έγινε χρήση του τρισδιάστατου σαρωτή EinScan Pro 2X HD της εταιρείας Shining 3D. Πρόκειται για έναν σαρωτή δομημένου φωτός που παρουσιάζει υψηλή ανάλυση (μέχρι και 0.004mm) και εντυπωσιακή ταχύτητα λήψης (μέχρι και 30 frames/sec ή 1,500,000 points/sec). Ο χειριστής έχει την δυνατότητα να αποτυπώσει το αντικείμενο με τρεις λειτουργίες που παρέχονται από την εφαρμογή του σαρωτή.



Εικόνα 73 Ο Σαρωτής EinScan Pro 2X HD της εταιρείας Shining 3D [\(πηγή\)](#)

- Η λειτουργία “Fixed Scan” κάνει την χρήση ενός συμπεριλαμβανομένου τρίποδου στο οποίο στερεώνεται ο σαρωτής και το αντικείμενο τοποθετείται στην βέλτιστη απόσταση από αυτόν. Στη συνέχεια το αντικείμενο μπορεί να περιστρέφεται χειροκίνητα πάντα σε σταθερή απόσταση από τον σαρωτή ώστε να αποτυπωθούν εξ ολοκλήρου όλες οι επιφάνειες του. Αντίθετα, αν επιθυμούμε ακόμα καλύτερα αποτελέσματα alignment σε αυτή την λειτουργία του σαρωτή μπορούμε να συνδέσουμε και ένα περιστροφικό τραπέζι “turn table”. Με την χρήση του turn table η διαδικασία περιστροφής του αντικειμένου γίνεται αυτόματα και οι μοίρες που γύρνα κάθε φορά το αντικείμενο καταγράφονται μέσω εσωτερικού αισθητήρα της συσκευής. Με τα επιπλέον αυτά δεδομένα από τις μοίρες περιστροφής το λογισμικό του σκάνερ μπορεί πολύ πιο εύκολα να «συρράψει» τις επιμέρους φωτογραφίες που αποτύπωσε από το αντικείμενο και το αποτέλεσμα του τελικού μοντέλου είναι βέλτιστο.
- Η λειτουργία “Handheld HD Scan” δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να κρατήσει τον σαρωτή στα χέρια του και να τον κινεί ελεύθερα στο χώρο. Η λειτουργία αυτή όπως υποδεικνύει και η ονομασία, εστιάζει στην υψηλή ανάλυση των δεδομένων που θα αποτυπωθούν παρέχοντας ανάλυση έως και 0.045mm χαρακτηρίζοντας την ιδανική για απεικόνιση αντικειμένων παρουσιάζουν αρκετές λεπτομέρειες. Το μειονέκτημα αυτής της λειτουργίας είναι ότι παρατηρείται σημαντική πτώση στη ταχύτητα σάρωσης μόλις μόνο στα 10 Frames ανά δευτερόλεπτο. Αυτό εν συνέπεια σημαίνει πως ο χρήστης θα πρέπει να μετακινεί τον σαρωτή αρκετά αργά και σταθερά περιμετρικά από το αντικείμενο ώστε να αποτυπώσει βέλτιστα το τελικό μοντέλο που επιθυμεί.
- Η λειτουργία “Handheld Rapid Scan” υπάρχει για να συμπληρώσει όπου υστερεί η λειτουργία “Handheld HD Scan”. Πάλι και αυτή η λειτουργία δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να κρατήσει τον σαρωτή στα χέρια του και να τον κινεί ελεύθερα στο χώρο, όμως τώρα εστιάζει περισσότερο στην ταχύτητα της σάρωσης και όχι στην ανάλυση όπως πάλι υποδηλώνει και το όνομα. Όπως είπαμε, σε αυτή την λειτουργία παρατηρείται πτώση της ανάλυσης μόλις στα 0.1mm που δε παύει να αποτελεί μια εξαιρετικά καλή ανάλυση. Για παράδειγμα σε

περίπτωση που θελήσουμε την αναπαράσταση με 3D εκτυπωτή της αγοράς τύπου FDM μόνο κάποιοι από αυτούς μπορούν να εκτυπώσουν με τόσο υψηλή ακρίβεια. Επόμενος καταλαβαίνουμε πως στις περισσότερες περιπτώσεις αυτή η ανάλυση επαρκεί σε αρκετές εφαρμογές. Τέλος στα πλεονέκτημα της λειτουργίας αυτής, η ταχύτητα σάρωσης ανεβαίνει στα 30 Frames ανά δευτερόλεπτο, γεγονός που σημαίνει πως κατά την διάρκεια της σάρωσης το αποτέλεσμα έχει μεγαλύτερες πιθανότητες να αποτυπωθεί βέλτιστα, λαμβάνοντας υπόψη τον ανθρωπινό παράγοντα (απότομες κινήσεις του χεριού, ανομοιόμορφη ταχύτητα λήψης).

Συμπερασματικά, καταλαβαίνουμε πως ανάλογα την εφαρμογή ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την λειτουργία που το εξυπηρετεί περισσότερο. Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως το λογισμικό παρέχει την δυνατότητα της υβριδικής λειτουργίας της σάρωσης, δηλαδή ο χρήστης μπορεί ανά πάσα στιγμή να αλλάξει την λειτουργία στην οποία βρίσκεται ο σαρωτής διατηρώντας τα μέχρι στιγμής ληφθέντα δεδομένα. Αυτό αποτελεί ένα πολύ δυνατό εργαλείο καθώς η σάρωση μπορεί να γίνει γρήγορα στα σημεία του αντικειμένου που το επιτρέπουν και στο τέλος με την λειτουργία υψηλής ανάλυσης μπορεί να γίνει ένα πέρασμα του αντικειμένου στα κομμάτια που παρουσιάζουν πολλές λεπτομέρειες. Με αυτό τον τρόπο καταφέρνουμε να αυξήσουμε την παραγωγικότητα και ταυτόχρονα να μειώσουμε το μέγεθος του αρχείου του αντικειμένου διατηρώντας χαμηλή ευκρίνεια στα μέρη που δεν το έχουν ανάγκη. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει αναλυτικά τα χαρακτηριστικά του σαρωτή στις διάφορες λειτουργίες του.

Technical Specifications (Scan Mode)	Handheld HD Scan	Handheld Rapid Scan	Fixed Scan with Turntable
Scan Accuracy	up to 0.045 mm	up to 0.1 mm	0.04 mm(single shot accuracy)
Volumetric Accuracy	0.3 mm/m (Markers Alignment)	0.3 mm/m (Markers Alignment)	/
Scan Speed	10 frames/s; 3,000,000 points/s	30 frames/s; 1,500,000 points/s	Single Scan < 0.5s
Point Distance	0.2 mm-3 mm	0.25 mm-3 mm	0.24 mm
Single Scan Range	209*160 mm—312*204 mm	209*160 mm—312*204 mm	209*160 mm—312*204 mm
Depth of Field	±100 mm	±100 mm	±100 mm
Working Distance	510 mm	510 mm	510 mm
Light Source	LED	LED	LED
Software Included	ExScan Pro, Solid Edge SHINING 3D Edition	ExScan Pro, Solid Edge SHINING 3D Edition	ExScan Pro, Solid Edge SHINING 3D Edition
Output Formats	OBJ; STL; ASC; PLY; P3; 3MF	OBJ; STL; ASC; PLY; P3; 3MF	OBJ; STL; ASC; PLY; P3; 3MF
Supported OS	Win10	Win10	Win10

Εικόνα 74 Τεχνικά χαρακτηριστικά του σαρωτή EinScan Pro 2X HD της εταιρείας Shining 3D [\(πηγή\)](#) .

4.1.2. Μέθοδος Σάρωσης και τεχνικές.

Το αντικείμενο που ζητήθηκε να σαρώσουμε και στη συνέχεια να συμπληρώσουμε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας αποτελεί ένα από τα πιο απαιτητικά αντικείμενα που μπορούν να αποτυπωθούν από τρισδιάστατο σαρωτή και μάλιστα τεχνολογίας δομημένου φωτός. Το αντικείμενο χαρακτηρίζεται απαιτητικό για δύο λόγους:

1^ο. Το αντικείμενο αποτελεί ένα μικρό σπασμένο κύπελο με διαστάσεις x: 61.3mm, y: 56.85mm και Z: 134.52mm. Το μικρό του μέγεθος, καθώς και τα πολύ λεπτά τοιχώματα του, καθιστούν πολύ δύσκολη την αποτύπωση του αντικείμενου. Ξανά, λόγω του πολύ λεπτού πάχους των τοιχωμάτων η διαδικασία της ευθυγράμμισης του εσωτερικού και του εξωτερικού μέρους του κυπέλου κρίθηκε πολύ απαιτητική, καθώς δεν υπήρχαν αρκετά κοινά σημεία αναφοράς.

2^ο . Το αντικείμενο είναι γυάλινο. Το γεγονός ότι το υλικό που είναι κατασκευασμένο το κύπελο είναι το γυαλί το καθιστά εξαιρετικά εύθραυστο καθώς συμπληρωματικά στο γεγονός αυτό, το αντικείμενο είναι αρκετά παλαιό και έχει υποστεί ήδη φθορές και σπασίματα, πράγμα που το καθιστά ακόμα πιο εύθραυστο από ένα απλό γυάλινο ποτήρι αφού έχουν σχηματιστεί ρωγμές. Συμπληρωματικά, το γυαλί όπως αναλύσαμε και σε προηγούμενα κεφάλαια της εργασίας αποτελεί ένα από τα πιο δύσκολα υλικά να αποτυπωθούν από σαρωτές που κάνουν χρήση του φωτός καθώς η επιφάνεια του είναι ανακλαστική. Το φως διαχέεται μέσω των υποστρωμάτων του γυαλιού, προκαλώντας σκέδαση. Το οπτικό σύστημα του σαρωτή συλλέγει αντανάκλασεις φωτός που περιέχουν κορυφές και έτσι πολλές φορές η επιφάνεια είτε δεν γίνεται αντιληπτή είτε στο αποτέλεσμα παρατηρείτε θόρυβος.

Με σκοπό να αντιμετωπιστούν τα παραπάνω προβλήματα για την διαδικασία της σάρωσης ακολουθήθηκαν οι παρακάτω τεχνικές. Αρχικά, το γεγονός ότι το αντικείμενο ήταν κατασκευασμένο από γυαλί καθιστούσε αδύνατη την σωστή αποτύπωση από τον σαρωτή. Έπρεπε λοιπόν να βρεθεί μια λύση που θα μετέτρεπε την επιφάνεια σε ματ υφή, με υψηλό βαθμό ανάκλασης του φωτός, χωρίς όμως να καταστραφεί αυτό το πολύτιμο πολιτισμικό κειμήλιο. Για αυτό το λόγο αποφασίστηκε να γίνει η χρήση ενός ειδικού αυτοεξαμιζόμενου σπρέι σχεδιασμένου για 3D scanning το οποίο προσφέρει μια λευκή ματ στρώση στο αντικείμενο η οποία εξαμιζείται αυτόματα από το αντικείμενο μόλις σε 4 ώρες. Την τεχνολογία αυτή την έχει αναπτύξει η γερμανική εταιρεία AESUB και το σπρέι που χρησιμοποιήθηκε ήταν το «AESUB Blue 3D Scan Spray». Μια άλλη πιο οικονομική εναλλακτική λύση θα ήταν η χρήση ενός σπρέι κιμωλίας. Το σπρέι κιόλας καταφέρει και αποτυπώνει το ίδιο επιθυμητό ματ φινίρισμα στο αντικείμενο που έχουμε σκοπό να σαρώσουμε, όμως το κύριο μειονέκτημα του είναι ότι δεν είναι αυτοεξαμιζόμενο. Αντίθετα με το σπρέι που χρησιμοποιήσαμε το σπρέι κιμωλίας για να αφαιρεθεί πρέπει να έρθει σε επαφή με νερό και σε αρκετές περιπτώσεις να τριφτεί απαλά με κάποιου είδους ύφασμα. Το γεγονός ότι το αντικείμενο του πειράματος ήταν έκθεμα μουσείου και αρκετά εύθραυστο κατέστησε απαγορευτική την χρήση του σπρέι αυτού.



Εικόνα 75 Παρουσίαση γυάλινου βάζου πριν και μετά την επικάλυψη του «AESUB Blue 3D Scan Spray». Αριστερά παρατηρούμε την υφή την επιφάνειας πριν την εφαρμογή και δεξιά μετά την εφαρμογή(πηγή).

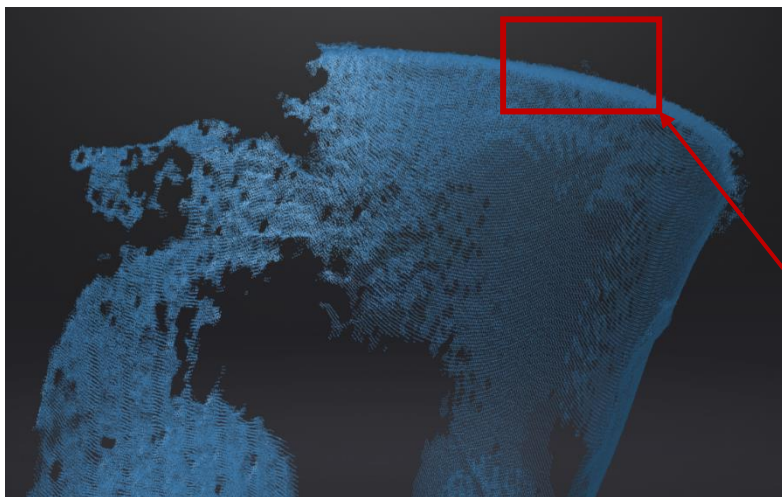
Αποφασίστηκε ότι η διαδικασία της σάρωσης να γίνει στην λειτουργία “Fixed Scan” που προσφέρει το λογισμικό του Scanner. Η επιλογή αυτή κατάφερε να λύσει δυο προβλήματα. Πρώτον το γεγονός ότι η απόσταση από το κύπελο ήταν σταθερή και αμετάβλητη βοήθησε τον σαρωτή να είναι πάντα στη βέλτιστη εστίαση ώστε να αποτυπωθεί σωστά κάθε πλευρά αυτού του μικρού αντικείμενου. Επιπλέον η λειτουργία “Fixed Scan” αποδίδει την μέγιστη ευκρίνεια που μπορεί να αποδώσει ο σαρωτής, γεγονός που εξυπηρετεί την αποτύπωση των αρκετών λεπτομερειών που παρατηρούνται στο κύπελο λόγω του μικρού μεγέθους του. Δεύτερον, κατά την λειτουργία “Fixed Scan” το λογισμικό του σαρωτή μας προσφέρει την δυνατότητα να συνδέσουμε το περιστροφικό τραπέζι. Στην επιφάνεια του περιστροφικού τραπεζιού παρατηρούμε κάποια ασπρόμαυρα κυκλικά αυτοκόλλητα γνωστά ως “Alignment Markers”. Τα αυτοκόλλητα αυτά μπορούν να αναγνωριστούν από το λογισμικό επεξεργασίας του σαρωτή κάνοντας την δουλειά μας αρκετά πιο εύκολη όσο αφορά την ευθυγράμμιση των σαρώσεων μας και συγκεκριμένα την ευθυγράμμιση της εσωτερικής με την εξωτερική μεριά του κυπέλου που φαινόταν να ήταν αρκετά δύσκολη λόγω του μικρού πάχους τοιχώματος.



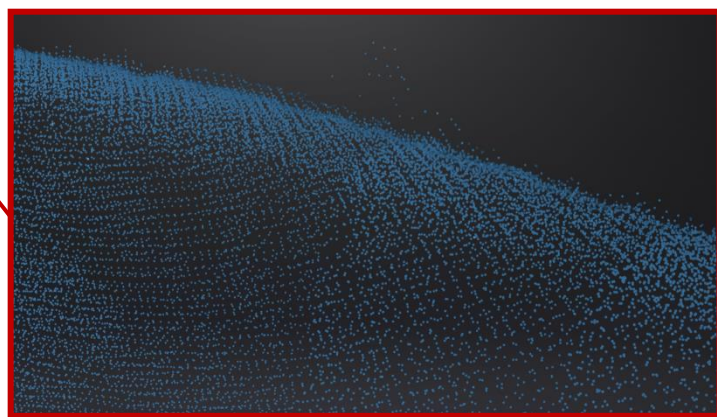
Εικόνα 76 Περιστροφικό τραπέζι “turn table” του σαρωτή EinScan Pro 2X HD. Στην εικόνα φαίνονται τα “Alignment Markers” (πηγή) .

4.1.3. Επεξεργασία των δεδομένων του σαρωτή.

Μετά την επιλογή της λειτουργίας και των παραμέτρων του σαρωτή καθώς και την διαδικασία της σάρωσης ακολούθησε η επεξεργασία των δεδομένων που συλλέξαμε. Τα δεδομένα που επιστρέφει ο σαρωτής έρχονται σε μορφή νέφους σημείων (point cloud), δηλαδή ξεχωριστά σημεία στο χώρο με ξεχωριστές καρτεσιανές συντεταγμένες το καθένα. Στην ακόλουθη εικόνα μπορούμε να δούμε τα σημεία αυτά στο περιβάλλον του λογισμικού Shiniig 3D.

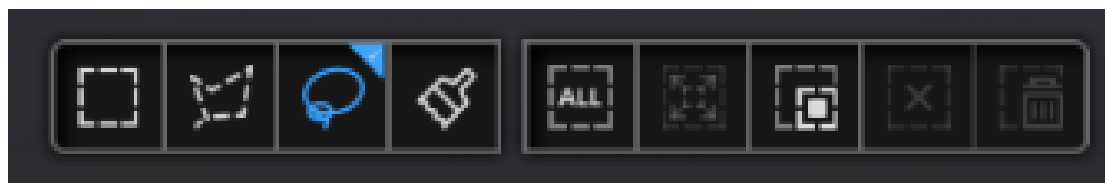


Εικόνα 77 Αναπαράσταση νέφους σημείων στο περιβάλλον του λογισμικού Shiniig 3D.



Εικόνα 78 Μεγέθυνση της εικόνας 77. Παρατηρούμε τα σημεία στο περιβάλλον του λογισμικού, το καθένα με τις δικές του ξεχωριστές συντεταγμένες. Τα σημεία που φαίνεται να εξέρχονται από το γενικό μοντέλο αποτελούν θόρυβο.

Το πρώτο βήμα που ακολουθεί είναι ο καθαρισμός των δεδομένων που έχουμε αποτύπωση από τα σημεία που αποτελούν θόρυβο όπως είδαμε και στην εικόνα 78. Για αυτή την διαδικασία το λογισμικό μας προσφέρει αρκετά εργαλεία, με τα οποία εύκολα και γρήγορα μπορούμε να επιλέξουμε και να ξεχωρίσουμε τα «καλά» δεδομένα από τα «κακά». Τα εργαλεία αυτά αποτελούν εργαλεία επιλογής “selection tools” και μπορούμε να τα δούμε στην εικόνα 79.



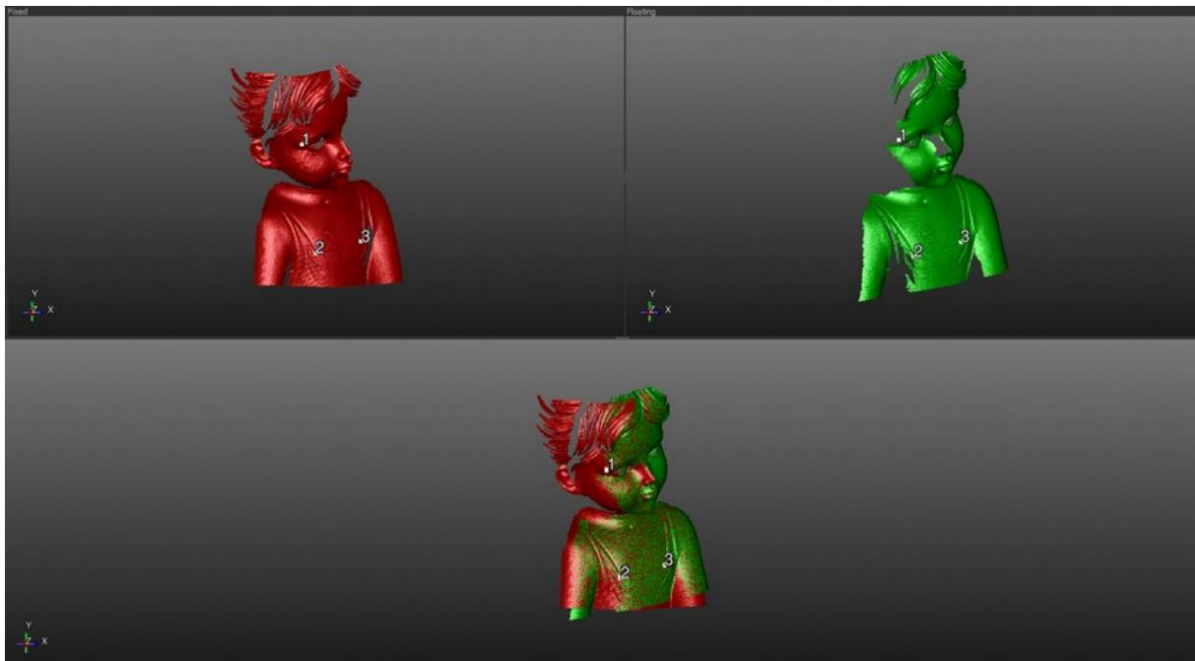
Εικόνα 79 Εργαλεία επιλογής “selection tools” του λογισμικού Shiniig 3D.

Τα βασικά εργαλεία επιλογής είναι τα ακόλουθα και παρουσιάζονται με την σειρά που εμφανίζονται στην εικόνα 79 από αριστερά προς τα δεξιά:

- **Rectangular tool**, επιλογή μέσω ενός ορθογωνίου
- **Polygon tool**, ο χρήστης επιλέγει διαφορά σημεία στον χώρο, τα σημεία αυτά ενώνονται με ευθύγραμμα τμήματα σχηματίζοντας ένα πολύγωνο, όσα σημεία εμπεριέχονται στο πολύγωνο αυτό επιλέγονται και στην συνέχεια μπορούν να διαγραφούν.

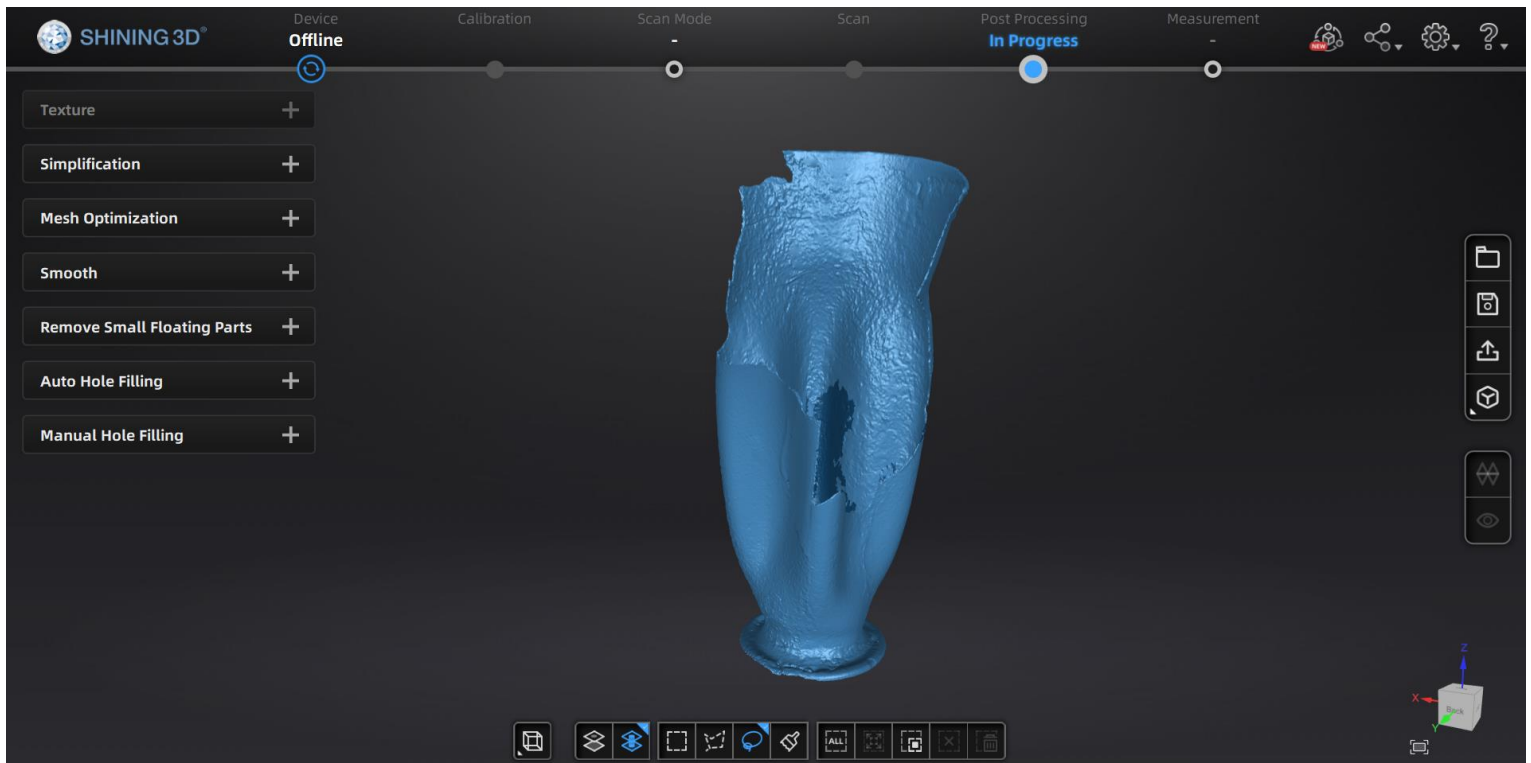
- **Lasso tool**, ο χρήστης μπορεί να σύρει τον δείκτη του ποντικιού στο χώρο της επιφάνειας εργασίας κυκλώνοντας τα σημεία που επιθυμεί να επιλέξει. Το σχήμα αυτό όπως υποδεικνύει και το όνομα του εργαλείου παρομοιάζει ένα λάσσο.
- **Paint brush tool**, το εργαλείο αυτό κυριολεκτικά παρομοιάζει ένα πινέλο με το οποίο οποία σημεία του νέφους καλύψουμε και χρωματίσουμε με αυτό επιλέγονται και δίνεται η δυνατότητα να αφαιρεθούν.
- **Select all**, το εργαλείο αυτό επιλεγεί όλα τα σημεία στο νέφος.
- **Connected domain**, το εργαλείο αυτό επιλέγει όλα τα σημεία που ακουμπάνε ή το πρόγραμμα θεωρεί πως ενώνονται με σημεία που έχουμε ήδη επιλέξει.
- **Invert**, όταν κάνουμε χρηστή αυτού το εργαλείου γίνεται αναστροφή και επιλέγονται όλα τα σημεία στον χώρο εκτός από αυτά που έχουμε επιλέξει μέχρι στιγμής.
- **Unselect**, το εργαλείο αναιρεί την επιλογή κάθε σημείου που έχουμε επιλέξει στο χώρο.
- **Delete Selected Data**, με αυτό το εργαλείο διαγράφουμε κάθε σημείο που έχει επιλεχτεί ως τώρα.

Δεύτερο βήμα στην επεξεργασία των δεδομένων αποτελεί η ευθυγράμμιση των πλέον «καθαρών» σημειακών νεφών. Αυτό μπορεί να γίνει αυτόματα με την βοήθεια του προγράμματος ή σε πιο απαιτητικές περιπτώσεις όπως αυτή μπορεί να γίνει χειροκίνητα με την επιλογή τριών κοινών σημείων ανάμεσα σε δυο διαφορετικά πακέτα δεδομένων. Ακολουθεί ενδεικτική εικόνα από την διαδικασία της χειροκίνητης ευθυγράμμισης.



Εικόνα 80 Διαδικασία χειροκίνητης ευθυγράμμισης με την βοήθεια τριών κοινών σημείων. (Scan in a box, 2015)

Μετά την ευθυγράμμιση όλων το σημείων των δεδομένων που έχουμε αποτυπώσει, επόμενο βήμα είναι η ένωση των σημείων με ευθύγραμμα τμήματά σχηματίζοντας τρίγωνα. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ένα mesh file το οποίο δημιουργείται αυτόματα από το λογισμικό τον επιλέξουμε το εργαλείο “generate mesh file”. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας μπορούμε να το δούμε στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 81 Στην εικόνα παρατηρείτε το πρώτο αποτέλεσμα δημιουργίας τρισδιάστατου μοντέλου στο χώρο του λογισμικού Shining 3D.

Αφού αποκτήσουμε το τρισδιάστατο μοντέλο μας σε μορφή mesh, φτάνουμε στο τελικό βήμα της διαδικασίας της σάρωσης που αποτελεί το “Post Processing”. Σε αυτό το στάδιο το λογισμικό του σαρωτή μας δίνει την δυνατότητα να επεξεργαστούμε περαιτέρω το μοντέλο. Οι επιλογές που μας δίνονται φαίνονται στην αριστερή πλευρά της εικόνας 81.

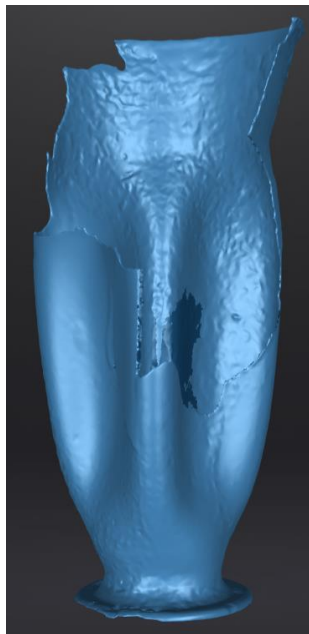
Η πρώτη επιλογή επεξεργασίας που εμφανίζεται είναι η επιλογή “**Texture**” αυτή η επιλογή παρατηρούμε πως δεν είναι διαθέσιμη και αυτό γίνεται καθώς δεν χρησιμοποιήσαμε δευτερεύουσα κάμερα που αποτυπώνει χρώμα για τον σκάνερ. Η επιλογή να μην καταγράψουμε χρώμα έγινε καθώς το αντικείμενο καλύφθηκε με λευκό σπρέι το οποίο δεν αποτελεί πληροφορία που θέλαμε να αποτυπώσουμε στο τελικό μοντέλο.

Η δεύτερη επιλογή που έχουμε ονομάζεται “**simplification**” και μας δίνει την επιλογή να μειώσουμε τον αριθμό των τριγώνων που αποτελούν το τρισδιάστατο μοντέλο. Με την απλοποίηση καταφέρνουμε να μικρύνουμε το αρχείο του μοντέλου όσο αφορά τον αποθηκευτικό χώρο που καταναλώνει αλλά ταυτόχρονα συμβιβάζομαστε με την μείωση της ανάλυσης που έχουμε καταφέρει να απεικονίσουμε. Στην περίπτωση της εργασίας αποφασίστηκε να γίνει μια απλοποίηση της τάξης του 10% μειώνοντας τα τρίγωνα σε 1.421.926. Με αυτό τον τρόπο το αρχείο έγινε «πιο ελαφρύ» διατηρώντας όμως την υψηλή ευκρίνεια του.

Η Τρίτη επιλογή που μας παρουσιάζεται είναι η “**Mesh Optimization**” αυτή επιλογή παρουσιάζει κονιά με την επιλογή “simplification” όμως η κυρία διαφορά της είναι ότι το λογισμικό αποφασίζει μόνο του ποια μέρη του μοντέλου θα κρατήσει με μεγαλύτερη ανάλυση και σε ποια θα μειώσει των αριθμό των τριγώνων. Αντίθετα η επιλογή “simplification” μειώνει τον αριθμό τριγώνων ομοιόμορφα σε όλο το μοντέλο. Στο δικό μας αντικείμενο αποφασίστηκε να γίνει “Mesh Optimization” της τάξης μεγέθους του 40% μειώνοντας σημαντικά το μέγεθος και την πολυπλοκότητα το μοντέλου,

διατηρώντας ωστόσο την ευκρίνεια του εκεί που το απαιτεί. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να επισημάνουμε πώς μειώνοντας το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του αρχείου συντελούμε σε μεγάλο βαθμό στην ευκολία επεξεργασίας του αντικείμενου σε επόμενα βήματα από τρίτες εφαρμογές που θα χρησιμοποιήσουμε για να επιτύχουμε την συμπλήρωση του. Αυτό οφείλετε στο γεγονός το θα χρειαστεί λιγότερη επεξεργαστική ισχύς κατά την λειτουργία των προγραμμάτων μοντελοποίησης επόμενος θα μειωθούν δραματικά και οι χρόνοι αναμονής των λειτουργιών.

Η τέταρτη επιλογή είναι η επιλογή **“Smooth”**, αυτή η επιλογή μπορεί να λειάνει το μοντέλο μας εξαφανίζοντας ή μειώνοντας τα σημάδια θορύβου που κάνουν το αντικείμενο να φαίνεται τραχύ. Καθώς στην περίπτωση μας το αντικείμενο είναι γυάλινο αποφασίστηκε να εφαρμοστεί αρκετά μεγάλο ποσοστό επεξεργασίας σε αυτό το βήμα ύψους 50%. Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 82 Μοντέλο μετά την επεξεργασία **“Smooth”** παρατηρούμε πως συγκριτικά με την εικόνα 81, η επιφάνεια φαίνεται να είναι αρκετά πιο λεία.

Η πέμπτη επιλογή που παρέχεται ονομάζεται **“Remove Small Floating Parts”**. Αυτή η λειτουργία όπως μπορούμε να καταλάβουμε αφαιρεί μικρά μοντέλα που μπορούν να εμφανίζονται στο τελικό προϊόν και στην ουσία να αποτελούν σημάδια θορύβου ή ανάκλασης της επιφάνειας του αντικείμενου. Στην περίπτωση μας δεν φάνηκε να σχηματίστηκαν τέτοια αντικείμενα ωστόσο είναι μια καλή τακτική να επιλέγουμε αυτή την επεξεργασία ανεξάρτητος καθώς μπορεί να υπάρχουν μικρά σωματίδια που δεν μπορούμε να αντιληφθούμε με την πρώτη με γυμνό μάτι και να αποτελέσουν πρόβλημα αργότερα.

Η έκτη επιλογή του λογισμικού ονομάζεται **“Auto hole filing”**. Σε αυτή την λειτουργία το λογισμικό εντοπίζει μόνο του τα κενά που παρατηρεί στο μοντέλο και τα συμπληρώνει ώστε να δημιουργήσει ένα συμπαγές μοντέλο(Solid body).

Η έβδομη και τελευταία επιλογή που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ονομάζεται **“Manual hole filing”** και στην ουσία μας παρέχει την δυνατότητα να συμπληρώσουμε μόνοι μας τα εικονικά κενά με τεχνικές που εμείς θεωρούμε αρμόζουσες. Στην περίπτωση του πειράματος καθώς με την επιλογή

“Auto hole filing” το λογισμικό έξαγε αποκλίνουσα αποτελέσματα αποφασίστηκε να κλίσουν κάποια κενά χειροκίνητα και κάποια να μείνουν ανοιχτά μέχρι μεταγενέστερο στάδιο. Αυτή η επιλογή βασίστηκε στο γεγονός πως σε αυτό το στάδιο έχει μεγαλύτερη σημασία να διατηρηθεί σωστά η γεωμετρία του αντικειμένου ώστε να μπορεί να γίνει σωστή μοντελοποίηση του συμπληρωματικού κομματιού του κυπέλου χρησιμοποιώντας το κύπελο ως αρχή αναφοράς. Αργότερα το μοντέλο θα μπορεί να στεγανοποιηθεί πλήρως ώστε να μπορεί να εκτυπωθεί με την βοήθεια ενός τρισδιάστατου εκτυπωτή ένα αντίγραφο του.

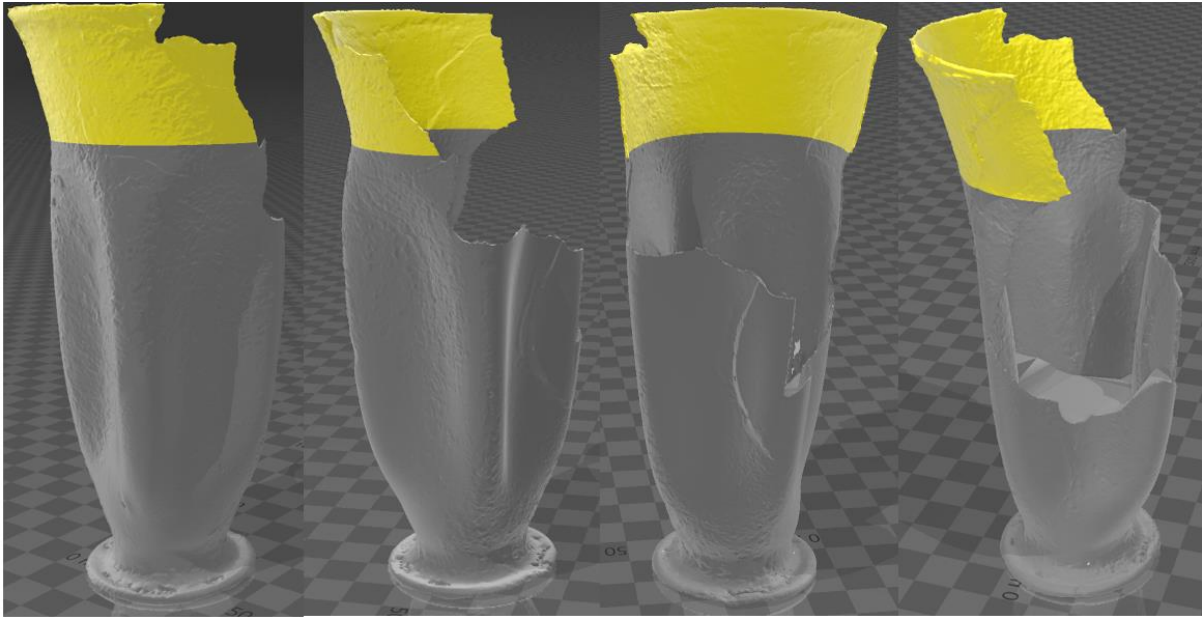
4.2. Διαδικασία ψηφιακής επεξεργασίας και ανακατασκευής του γυάλινου αγγείου.

Σε αυτό το σημείο έχουμε καταφέρει να αποκτήσουμε ένα ψηφιακό αντίγραφο του κυπέλου το οποίο θα χρησιμοποιηθεί ως αναφορά για την σχεδίαση του κομματιού συμπλήρωσης. Παρατηρούμε ότι στο συγκεκριμένο αγγείο φαίνεται να λυπεί μεγαλύτερο από το 50% της περιμετρικής του δομής. Ωστόσο είναι σημαντικό ότι έχουν διατηρηθεί όλα τα κυρία δομικά χαρακτηριστικά της γεωμετρικής ταυτότητας του. Στα παρακάτω υποκεφάλαια, θα αναλυθεί πλήρως η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την συμπλήρωση και την ανακατασκευή του μοντέλου, καθώς και η τεχνική με την οποία σχηματίστηκε το κομμάτι συμπλήρωσης που θα μπορούσε να τοποθετηθεί στο πρωτότυπο αγγείο.

4.2.1. Τεχνική συμπλήρωσης/Ανακατασκευή Προτύπου.

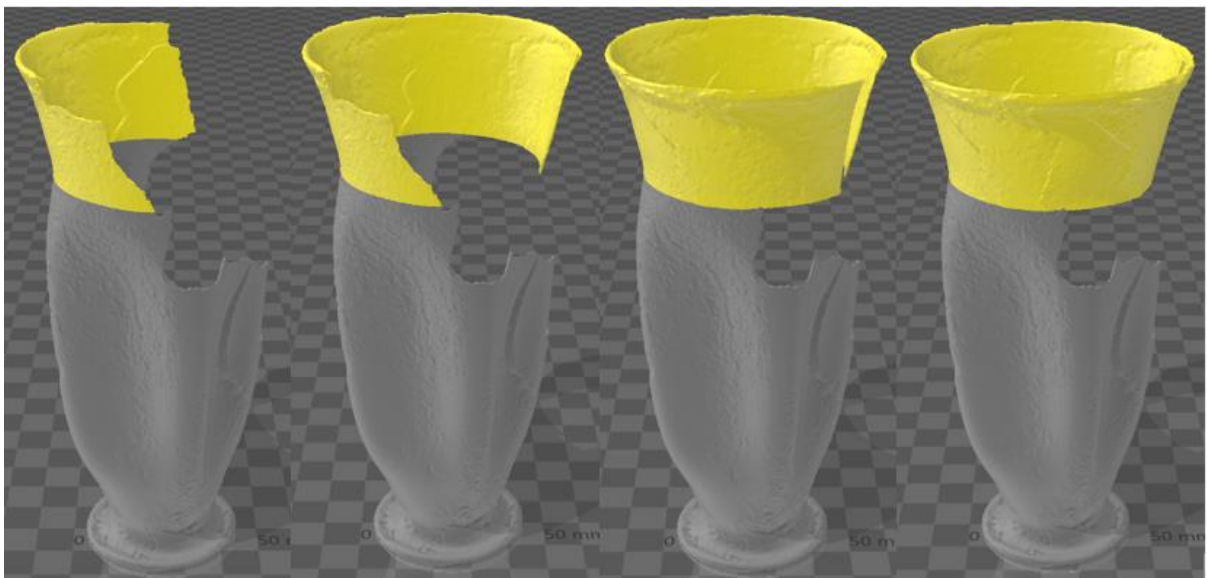
Για την συμπλήρωση και την ανακατασκευή του αγγείου έγινε η επιλογή του λογισμικού προγράμματος επεξεργασίας 3D Builder της εταιρείας Microsoft. Το 3D Builder αποτελεί ένα δωρεάν λογισμικό αρκετά ευχάριστο, ανεπτυγμένο ειδικά για την επεξεργασία Mesh αρχείων. Παρόλο που υπάρχουν αρκετά πιο ανεπτυγμένα προγράμματα μοντελοποίησης όπως το Fusion 360, το Solidworks, το Blender και πολλά ακόμα, πάρθηκε η απόφαση να γίνει η χρήση του λογισμικού 3D builder, καθώς παρέχεται δωρεάν και καλύπτει πλήρως τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας.

Έπειτα από ανάλυση του μοντέλου του αγγείου παρατηρήθηκε ότι επί της ουσίας το μοντέλο αποτελείται από 2 βασικές γεωμετρικές αναφορές. Όπως θα παρατηρήσουμε και στην εικόνα 83 το αντικείμενο μπορεί να χωριστεί με μια οριζόντια νοητή ευθεία σε δύο βασικές γεωμετρίες. Το πάνω τμήμα χρωματισμένο με κίτρινο χρώμα αποτελεί έναν δακτύλιο, ενώ το κάτω τμήμα φαίνεται να απαρτίζεται από ένα μοτίβο που επαναλαμβάνεται 4 φορές συνολικά σχηματίζοντας 4 πλευρές με αυλακώσεις.



Εικόνα 83 Το αγγείο χωρισμένο σε 2 κομμάτια, η διαχώριση γίνεται αντιληπτή με την χρωματική διαφοροποίηση. Στην φωτογραφία παρατηρούμε στιγμιότυπα από τις 4 πλευρές του μοντέλου στο περιβάλλον του λογισμικού 3D Builder.

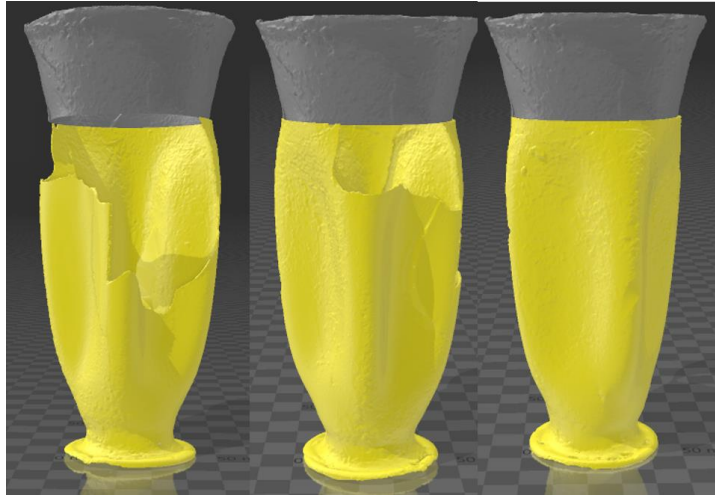
Η τεχνική που θα ακολουθήσουμε ξεκινώντας την ανακατασκευή από το πάνω μέρος του αγγείου είναι να αντιγράψουμε το τονισμένο με κίτρινο χρώμα μέρος και σταδιακά να το περιστρέψουμε 90 μοίρες οριζόντια και να το ευθυγραμμίσουμε κατάλληλα, αναπαριστώντας έτσι έναν ολοκληρωμένο δακτύλιο. Η πορεία της διαδικασίας διατυπώνεται στην εικόνα 84.



Εικόνα 84 Στην εικόνα παρατηρούμε την διαδικασία της συμπλήρωσης του δακτυλίου με την πορεία να αναπτύσσεται από αριστερά προς τα δεξιά με αποτέλεσμα ένα πλήρη δακτύλιο.

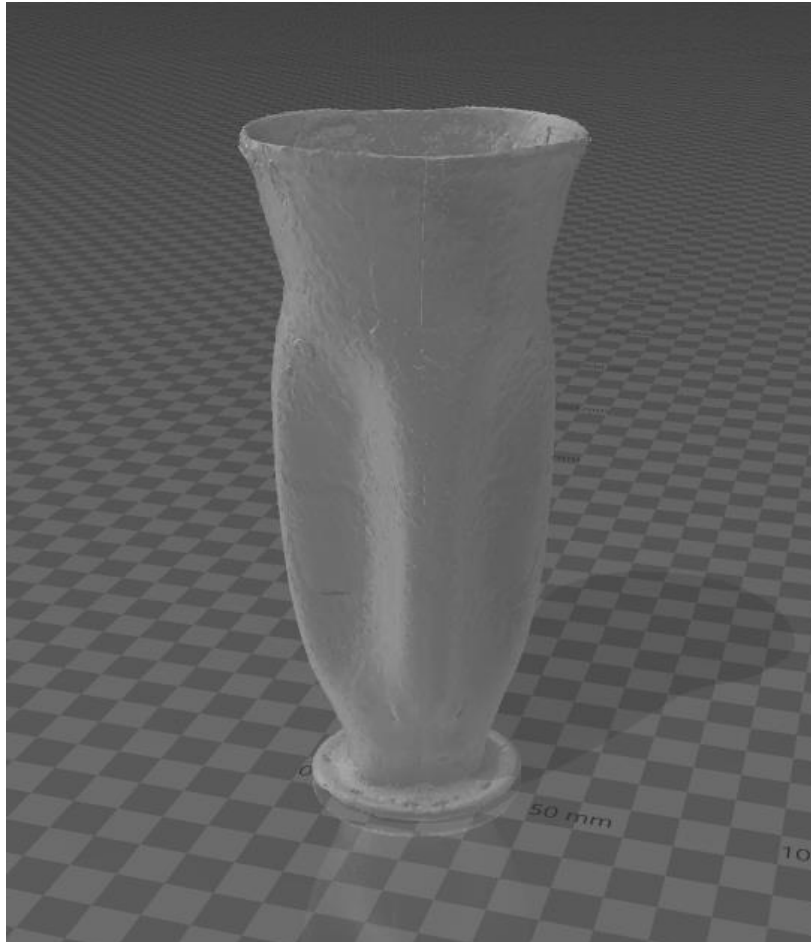
Επόμενο και πιο απαιτητικό βήμα είναι η συμπλήρωση και αναπαράσταση του κάτω μέρους του αγγείου όπου αποτελεί γεωμετρία μοτίβου. Η τεχνική που θα ακολουθήσουμε είναι παρόμοια με αυτή του πάνω τμήματος μόνο που τώρα αναγκαστικά θα «κόψουμε» το μοντέλο σε μικρότερα τμήματα και ακολουθώντας το κυκλικό μοτίβο θα «γεμίσουμε» σταδιακά το μοντέλο. Ως δυσκολία της τεχνικής παρουσιάζεται η ευθυγράμμιση των κομματιών που θα προθέτονται στα ήδη καθορισμένα στο χώρο. Η διαδικασία της συμπλήρωσης και τα στάδια της διατυπώνονται στην

εικόνα 85. Σε αυτό το στάδιο της επεξεργασίας το κάτω τμήμα του μοντέλου χρωματίστηκε με κίτρινο χρώμα για να δηλωθεί η επεξεργασία του.



Εικόνα 85 Στην εικόνα παρατηρούμε την διαδικασία της συμπλήρωσης του γεωμετρικού μοτίβου που παρατηρείται στο κάτω τμήμα το αγγείου που τονίζεται με κίτρινο χρώμα.

Συμπληρώνοντας πλέον και τα δύο τμήματα του σπασμένου αγγείου επιτεύχθηκε η ανακατασκευή και η αναπαράσταση ενός προτύπου που παρομοιάζει το αυθεντικό μοντέλο πριν την καταστροφή του. Η εργασία θα μπορούσε να σταματήσει εδώ αν ο σκοπός μας θα ήταν να καταγράψουμε αυτό το πολιτισμικό κειμήλιο σε μια ψηφιακή βιβλιοθήκη. Πάραυτα, σκοπό της εργασίας αποτελεί η ανακατασκευή του πραγματικού αγγείου και όχι του ψηφιακού. Για αυτό τον λόγο, το μοντέλο που μόλις δημιουργήσαμε θα αποτελέσει εργαλείο για την δημιουργία του κομματιού συμπλήρωσης που θα τοποθετηθεί στο αγγείου αφού εκτυπωθεί με την βοήθεια τρισδιάστατου εκτυπωτή. Το τελικό συμπληρωμένο μοντέλο του αγγείου παρουσιάζεται στην εικόνα 86.

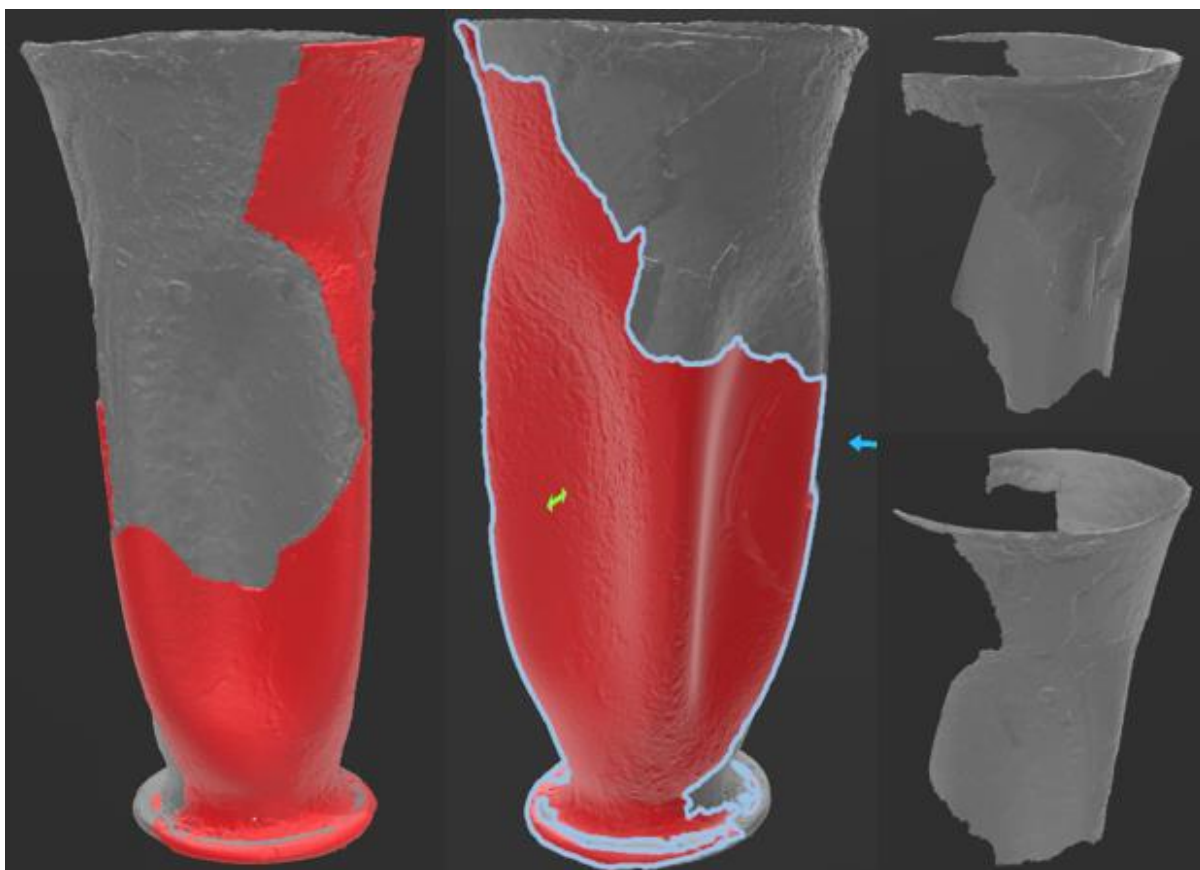


Εικόνα 86 Τελικό συμπληρωμένο γυάλινο αγγείο.

4.2.2. Δημιουργία Κομματιού Συμπλήρωσης.

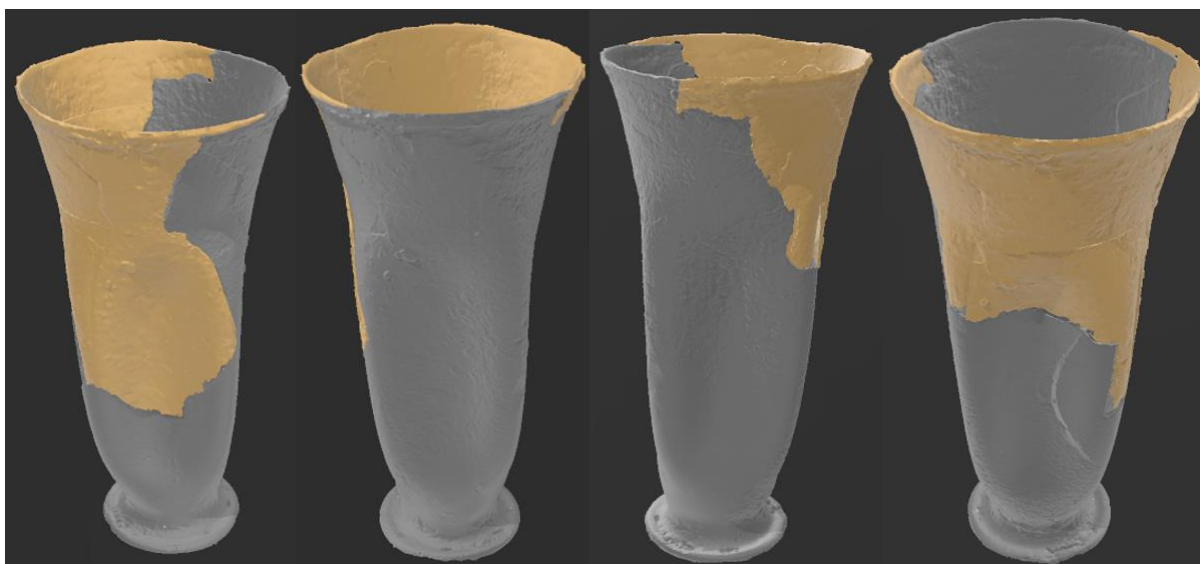
Για την δημιουργία κομματιού συμπλήρωσης του σπασμένου κυπέλου επιλέχθηκε το πρόγραμμα Meshmixer της εταιρείας Autodesk που παρέχεται και πάλι δωρεάν σε οικιακούς χρήστες και πανεπιστήμια. Το Meshmixer αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση επεξεργασίας αρχείων τύπου mesh και παρέχει ένα πλούσιο σετ εργαλείων που θα βοηθήσουν στην επεξεργασία των μοντέλων μας. Το πρόγραμμα ωστόσο φαίνεται να δυσκολεύεται περισσότερο με αρχεία μεγάλης ανάλυσης σε σχέση με τον πρόγραμμα του ανταγωνισμού 3D Builder για αυτό ήρθε να παίξει συμπληρωματικό ρόλο στην εργασία και όχι αποκλειστικό.

Η τεχνική που ακολουθήθηκε για την δημιουργία του κομματιού εκτύπωσης παρουσιάζεται σχετικά απλή. Έχοντας στα χέρια μας πλέον δύο ακριβή μοντέλα, το αρχικό σπασμένο πρωτότυπο και το συμπληρωμένο μοντέλο που δημιουργήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, έχουμε την δυνατότητα να ευθυγραμμίσουμε τα δυο μοντέλα και αφαιρώντας το ένα από το σύνολο του άλλου να βρεθούμε με το υπολειπόμενο κομμάτι που αποτελεί την διαφορά τους. Το κομμάτι αυτό που περιγράφεται αποτελεί το κομμάτι συμπλήρωσης του αγγείου που χρειαζόμαστε. Η Διαδικασία της τεχνικής αναπαρίσταται στην εικόνα 87.



Εικόνα 87 Αναπαράσταση της διαδικασίας δημιουργίας του συμπληρωματικού κομματιού.

Στην εικόνα 87 παρατηρούμε την διαδικασία που δημιουργήθηκε το κομμάτι συμπλήρωσης. Με κόκκινο χρώμα έχουμε χρωματίσει το πρωτότυπο σαρωμένο κύπελο το οποίο είναι σπασμένο και με γκρι χρώμα παρουσιάζεται το συμπληρωμένο μοντέλο που δημιουργήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην κεντρική εικόνα επιλέγεται το κόκκινο πρωτότυπο μοντέλο και διαγράφεται. Όταν αφαιρέθηκε, προϊόν ήταν το κομμάτι συμπλήρωσης που βλέπουμε στην δεξιά πλευρά της εικόνας 87 στην μπροστά και πίσω όψη του. Είναι σημαντικό να τονίσουμε πώς, όπως βλέπουμε στις δυο εικόνες αριστερά κάποια σημεία στην βάση αλλά και σε άλλα σημεία του αγγείου δεν ευθυγραμμίστηκαν βέλτιστα. Για αυτό τον λόγο στο τελικό αποτέλεσμα, αυτά τα μικρά κομμάτια χρειάστηκε να αφαιρεθούν χειροκίνητα με το εργαλείο “lasso tool” που προσφέρει το πρόγραμμα Meshmixer. Το τελικό Rendering του σπασμένου αγγείου μαζί με το κομμάτι συμπλήρωσης αναπαρίσταται στην εικόνα 88.



Εικόνα 88 Τελική παρουσίαση (Rendering) του σαρωμένου πρωτοτύπου αρχείου σε γκρι χρώμα μαζί με το κομμάτι συμπλήρωσης που δημιουργήθηκε σε κίτρινο χρώμα.

4.3. Διαδικασία Εκτύπωσης και αναπαράστασης γυάλινου αγγείου.

Για την επεξεργασία του αρχείου του μοντέλου και την μετατροπή του σε γλώσσα μηχανής (g-code), απαιτείται ένα λογισμικό πρόγραμμα “Slicer”. Το λογισμικό που επιλέχθηκε στα πλαίσια της εργασίας ονομάζεται Cura της εταιρείας Ultimaker στην έκδοση 5.0.0. και αποτελεί ένα δωρεάν προϊόν. Ο εκτυπωτής τριών διαστάσεων στον οποίο θα λάβει μέρος η διαδικασία της εκτύπωσης είναι ο Creality Ender-3 Pro V2. Στα προηγούμενα κεφάλαια αναπτύξαμε 3 διαφορετικά μοντέλα με βάση την αρχική σάρωση που πραγματοποιήθηκε στο σπασμένο κύπελο. Ένα 100% συμπληρωμένο μοντέλο του πρότυπου αγγείου, ένα ακριβές αντίγραφο του πρωτοτύπου αγγείου και τέλος το κομμάτι συμπλήρωσης που θα συμπληρωθεί στο γνήσιο αγγείο. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αποτυπωθεί η διαδικασία εκτύπωσης και οι παράμετροι των εκτυπώσεων και για τα 3 αυτά μοντέλα.

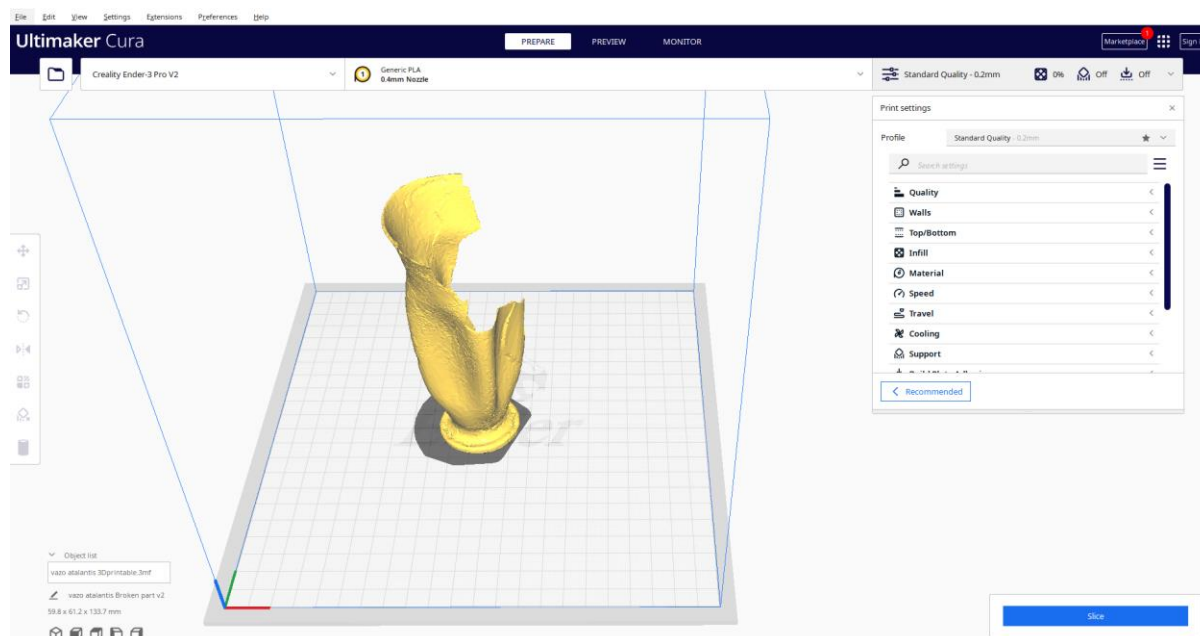
4.3.1. Τεχνολογία 3D εκτυπωτή και υλικά

Έπειτα από έρευνα, αποφασίστηκε πώς η εκτύπωση των τριών μοντέλων θα γίνει με την βοήθεια την βοήθεια εκτυπωτή τεχνολογίας τύπου FDM, συγκεκριμένα με τον εκτυπωτή της εταιρίας Creality και μοντέλο Ender-3 Pro V2. Ο εκτυπωτής αυτός κατατάσσεται στους εκτυπωτές προσιτής οικονομικής λύσης και παρουσιάζει εξαιρετικά αποτελέσματα θερμοπλαστικών μοντέλων.

Το υλικό που αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της αναπαράστασης του γυάλινου αγγείου είναι το πολυγαλακτικό οξύ ή πολυλακτίδιο (PLA). Το PLA αποτελεί ένα βιοδιασπώμενο θερμοπλαστικό που κατασκευάζεται από βιομάζα όπως το καλαμπόκι ή το ζαχαροκάλαμο. Αποτελεί ένα χημικά ευσταθές υλικό που δεν θα φέρει κίνδυνο στο γυάλινο αντικείμενο πολιτισμικής κληρονομιάς κατά την επαφή του. Ένα από τα μειονεκτήματα του υλικού αυτού είναι το χαμηλό θερμοκός δείκτης παραμόρφωσης του μόλις στους 60 με 65 °C. Αυτό ωστόσο δεν προβλέπεται να αποτελέσει πρόβλημα στην εργασία μας καθώς το αντικείμενο εκτιμάται να αποθηκευτεί σε εσωτερικό χώρο του μουσείου.

4.3.2. Παράμετροι Εκτύπωσης.

Τα μοντέλα τα οποία έχουμε σκοπό να αναπαραστήσουμε με την βοήθεια του τρισδιάστατου εκτυπωτή χαρακτηρίζονται ως μικρά, παρουσιάζουν αρκετή λεπτομέρεια και απαρτίζονται από περίπλοκη γεωμετρία στο σημείο του σπασίματος. Για αυτό τον λόγο οι παράμετροι της εκτύπωσης θα πρέπει να επιλεχθούν με αρκετά μεγάλη προσοχή ώστε να επιτευχθεί ένα ακριβές και λεπτομερές αποτέλεσμα. Στην εικόνα 89 παρατηρούμε το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού Ultimaker Cura.



Εικόνα 89 Περιβάλλον λογισμικού Ultimaker Cura έκδοση 5.0.0.

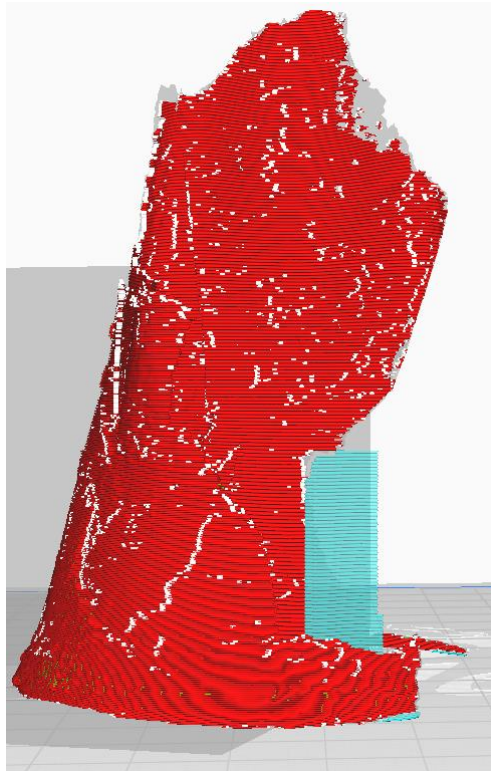
Παρατηρώντας το περιβάλλον εργασίας του προγράμματος Slicer στην εικόνα 89, στο αριστερό μέρος βλέπουμε τα εργαλεία επεξεργασίας του μοντέλου και ξεκινώντας από πάνω προς τα κάτω μας παρέχονται οι ακόλουθες δυνατότητες :

- Μεταφορά του μοντέλου στον χώρο.
- Μετατροπή της κλίμακας του μοντέλου στο χώρο.
- Περιστροφή του μοντέλου στο χώρο.
- Αναστροφή του μοντέλου σε όλες τις κατευθύνσεις.
- Επιλογή τμημάτων στα οποία δεν επιθυμούμε να τοποθετηθούν κολόνες στήριξης.
- Τοποθέτηση κολώνων στήριξης χειροκίνητα.

Στο επάνω τμήμα της επιφάνειας εργασίας παρατηρείται η επιλογή του καθορισμού του εκτυπωτή στον οποίο θα εκτελεστούν οι εντολές που θα εξάγουμε από το πρόγραμμα, στην δίκη μας περίπτωση, έχει γίνει επιλογή του Creality Ender-3 Pro V2. Αμέσως δεξιά βλέπουμε την επιλογή καθορισμού του υλικού εκτύπωσης και όπως αναφέραμε και προηγούμενος θα γίνει επιλογή του θερμοπλαστικού PLA. Στο δεξιό τμήμα της επιφάνειας εργασίας βρίσκονται οι παράμετροι της εκτύπωσης. Ακολουθούν αναλυτικά οι παράμετροι που παρέχονται προς επεξεργασία από το λογισμικό καθώς και οι επιλογές που έγιναν στα πλαίσια της εκτύπωσης.

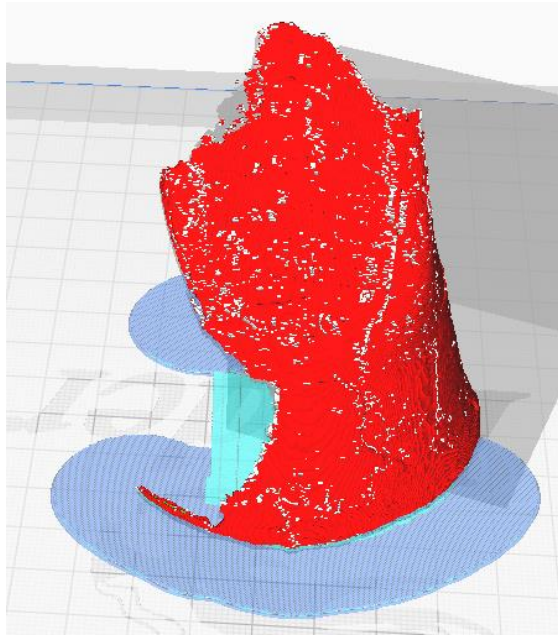
- **Ποιότητα (Quality):** Η ποιότητα οριστική στα 0.2mm. Η ποιότητα αναφέρεται στο πάχος κάθε στρώσης και το μέγεθος 0.2mm αποτελεί μια ισορροπία ανάμεσα σε υψηλή ανάλυση του μοντέλου αλλά και της ταχύτητας εκτύπωσης.
- **Τοίχωμα (Walls):** Για το τοίχωμα επιλέχθηκε πάχος τριών στρώσεων. Το τοίχωμα αναφέρεται στο πόσες στρώσεις πλαστικού θα εναποθετηθούν στην περίμετρο του μοντέλου. Το εσωτερικό του μοντέλου συμπληρώνετε με γέμισμα (infill) το ποιο θα αναλύσουμε παρακάτω. Το πάχος των τοιχωμάτων δηλαδή όπου αυτό θα είναι δυνατό από τους περιορισμούς του μοντέλου θα είναι 0.4(όπου είναι το πάχος του νήματος που εναποθέτει το ακροφύσιο)*3= 1.2mm
- **Πάτωμα και ταβάνι (top/Bottom):** Η παράμετρος αυτή αναφέρεται στις στρώσεις που θα τοποθετηθούν στο κάτω και το πάνω τμήμα του αντικειμένου. Στις καθορισμένες περιοχές αυτές το υλικό συμπληρώνει το 100% της επιφάνειας του μοντέλου δημιουργώντας όπως υποδηλώνει και το όνομα πάτωμα και ταβάνι. Το πάχος που καθοριστικό ήταν 0.8mm και για το πάτωμα αλλά και το ταβάνι. Θα εναποθέτουν δηλαδή 4 στρώσεις (4*0.2=0.8mm).
- **Γέμισμα (Infill):** Το γέμισμα καθορίζει το ποσό πυκνό θα είναι το εσωτερικό του αντικειμένου που εκτυπώνεται. Ο καθορισμός γίνεται με δήλωση ποσοστού και παρέχεται και η επιλογή του μοτίβου της συμπλήρωσης. Στην δικιά μας περίπτωση επιλέχτηκε 20% γέμισμα με την επιλογή του μοτίβου Cubic.
- **Υλικό (Material):** Σε αυτή την παράμετρο καθορίζονται οι θερμοκρασίες της κεφαλής εκτύπωσης και της πλατφόρμας του εκτυπωτή σε συνάρτηση πάντα με το υλικό που εκτυπώνουμε. Σε αυτό το στάδιο ακολουθούμε πάντα τις οδηγίες του κατασκευαστή του υλικού και στην δική μας περίπτωση προτείνεται 200C στην κεφαλή εκτύπωσης και 60C στην πλατφόρμα του εκτυπωτή.
- **Ταχύτητα(Speed):** Σε αυτή την παράμετρο καθορίζεται η ταχύτητα με την οποία μετακινείται η κεφαλή του εκτυπωτή κατά την διάρκεια της εκτύπωσης. Στην δικιά μας περίπτωση καθώς και τα τρία μοντέλα παρουσιάζουν αρκετά λεπτά τοιχώματα και πολλαπλά σημεία με εξαιρετική λεπτομέρεια αποφασίστηκε η ταχύτητα των 50mm/sec εξασφαλίζοντας την σταθερότητα των τοιχωμάτων κατά την εκτύπωση τους και την επιτυχία της διαδικασίας.
- **Πορεία κεφαλής (travel):** Σε αυτή την παράμετρο καθορίζονται αρκετές επιλογές. Αρχικά καθορίζεται η απόσταση που διανύει το καρούλι του πλαστικού όταν αυτό γύρνα αντίθετα προς τα πίσω όταν ο εκτυπωτής κάνει παύση της ροής του πλαστικού για να μεταφερθεί από ένα σημείο σε κάποιο άλλο. Επιπλέον καθορίζεται και η ταχύτητα με τη οποία διακόπτεται η πορεία του πλαστικού. Μια συμπληρωματική τεχνική που ακολουθήσαμε σε αυτό το βήμα ήταν η επιλογή της λειτουργίας “Z Hop”. Όταν αυτή η επιλογή είναι ενεργοποιημένη η κεφαλή σηκώνεται λίγο κάθε φορά όταν δεν εναποθέτει υλικό ώστε κατά την διαδρομή της να αποφευχθεί η σύγκρουση με κάποιο από τα λεπτά τοιχώματα του μοντέλου μας. Σε περίπτωση σύγκρουσης η διαδικασία της εκτύπωσης παρουσιάζει αρκετές πιθανότητες να αποτύχει.
- **Ψύξη (Cooling)** Σε αυτή την παράμετρο καθορίζεται η ισχύς του ανεμιστήρα που είναι υπεύθυνος για την ψύξη του πλαστικού μετά την εναπόθεση του σε υγρή μορφή πάνω στο μοντέλο. Αυτή η παράμετρος αποτελεί ακόμα μια που αλλάζει από υλικό σε υλικό και η συμβουλή του κατασκευαστή φαίνεται να είναι η πιο φρόνιμη στην επιλογή της τιμής. Λαμβάνοντας αυτό υπ’ όψη η παράμετρος της ψύξης τέθηκε στο 100%.

- **Κολόνες στήριξης (Support):** Οι κολόνες στήριξης έρχονται να παίξουν βοηθητικό ρόλο σε σημεία του μοντέλου που χρειάζεται να γίνει εναπόθεση υλικού υπό γωνία μεγαλύτερη των 60 μοιρών. Αυτό συμβαίνει καθώς το πλαστικό εξέρχεται από το ακροφύσιο σε υγρή μορφή και όταν δεν παρουσιάζεται αρκετά μεγάλη επιφάνεια ώστε να δράσει ως στήριγμα για το νέο υλικό, αυτό έχει την τάση να στάζει. Για αυτό τον λόγο στις περιπτώσεις αυτές τοποθετούνται στηρίγματα σε μορφή κολόνας, και κατά την ολοκλήρωση του μοντέλου αφαιρούνται με το χέρι ή την βοήθεια άλλων εργαλείων. Στην δικιά μας περίπτωση δεν χρειάστηκε να τοποθετηθούν στηρίγματα, με εξαίρεση το κομμάτι συμπλήρωσης που παρουσίασε γωνίες που ξεπερνούσαν τις 60 μοίρες σε κάποια σημεία. Ακολουθεί υποδειγματική εικόνα.



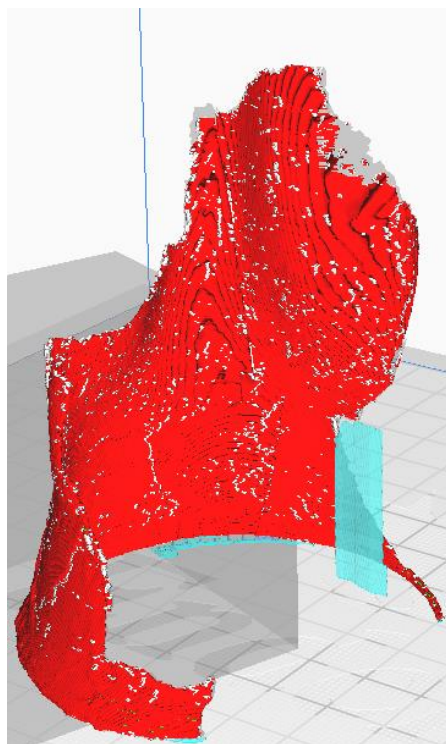
Εικόνα 90 Στιγμιότυπο από το περιβάλλον εργασίας του λογισμικού Cura. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζεται το μοντέλο προς εκτύπωση και με μπλε οι κολόνες στήριξης που τοποθετήθηκαν στο σημείο που είχε κλίση μεγαλύτερη από 60 μοίρες.

- **Προσκόλληση στην πλατφόρμα (Build plate adhesion):** Αυτή η παράμετρος παρέχει επιλογές που βοηθούν στην καλύτερη προσκόλληση του μοντέλου στην πλατφόρμα εκτύπωσης. Για παράδειγμα έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει μια λεπτή πλατφόρμα πλαστικού που επεκτείνεται εκτός της περιμέτρου του αντικειμένου ώστε να αυξήσει την επιφάνεια επαφής ένταξη μοντέλου και πλατφόρμας. Στην δικιά μας περίπτωση λόγω της κυκλικής γεωμετρίας του μοντέλου και λόγω της ιδιότητας του PLA να κολλάει επαρκώς στην πλατφόρμα όταν αυτή θερμαίνεται στους 60C η χρήση περεταίρω πρόσκλησης δεν θεωρήθηκε αναγκαία. Ωστόσο στα πλαίσια της παρουσίασης της λειτουργίας ακολουθεί εικόνα που επιδεικνύει την πλατφόρμα συγκόλλησης με ονομασία “Raft” στο μοντέλο μας.

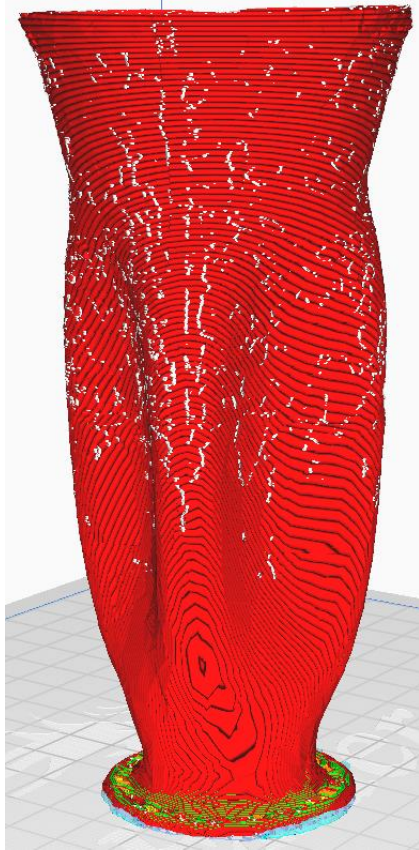


Εικόνα 91 Παρουσίαση της επιλογής “Raft” (Δεν τοποθετήθηκε στην τελική παραμετροποίηση της εκτύπωσης).

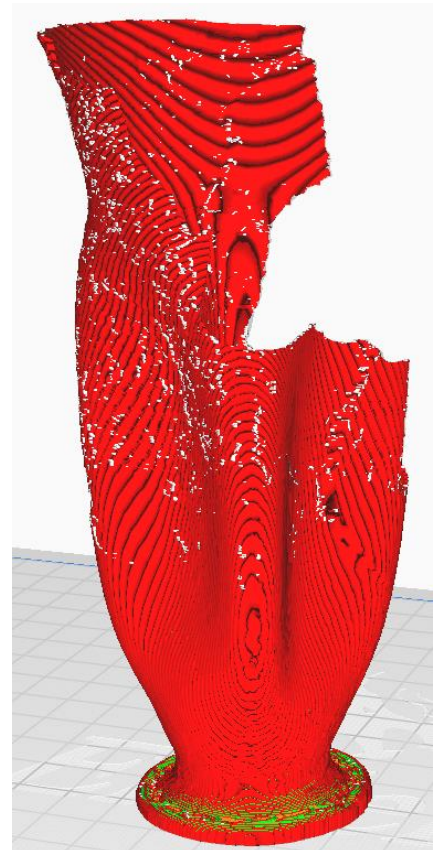
Αφού οριστούν όλες οι παράμετροι της εκτύπωσης, το λογισμικό παρουσιάζει μια προσομοίωση του εκτυπωμένου αντικείμενου, το βάρος του καθώς και τη διάρκεια του χρόνου που υπολογίζει ότι θα διαρκέσει η διαδικασία της εκτύπωσης. Ακολουθούν εικόνες με τις προσομοιώσεις και των τριών μοντέλων, τα βάρη καθώς και η διάρκεια εκτύπωσης που εκτιμήθηκε.



Εικόνα 92 Προσομοίωση κομματιού συμπλήρωσης.
Χρόνος εκτύπωσης: 1 ώρα και 44 λεπτά.
Βάρος: 6 γραμμάρια.

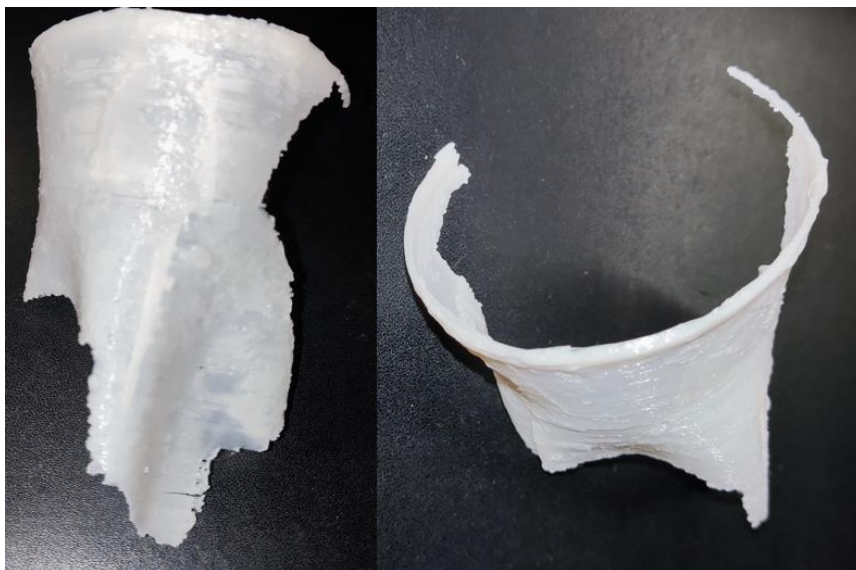


Εικόνα 93 Προσομοίωση Συμπληρωμένου αγγείου.
Χρόνος Εκτύπωσης: 6 ώρες και 11 λεπτά.
Βάρος: 36 γραμμάρια.



Εικόνα 94 Προσομοίωση πρωτοτύπου σπασμένου αγγείου.
Χρόνος Εκτύπωσης: 3 ώρες και 2 λεπτά.
Βάρος: 15 γραμμάρια.

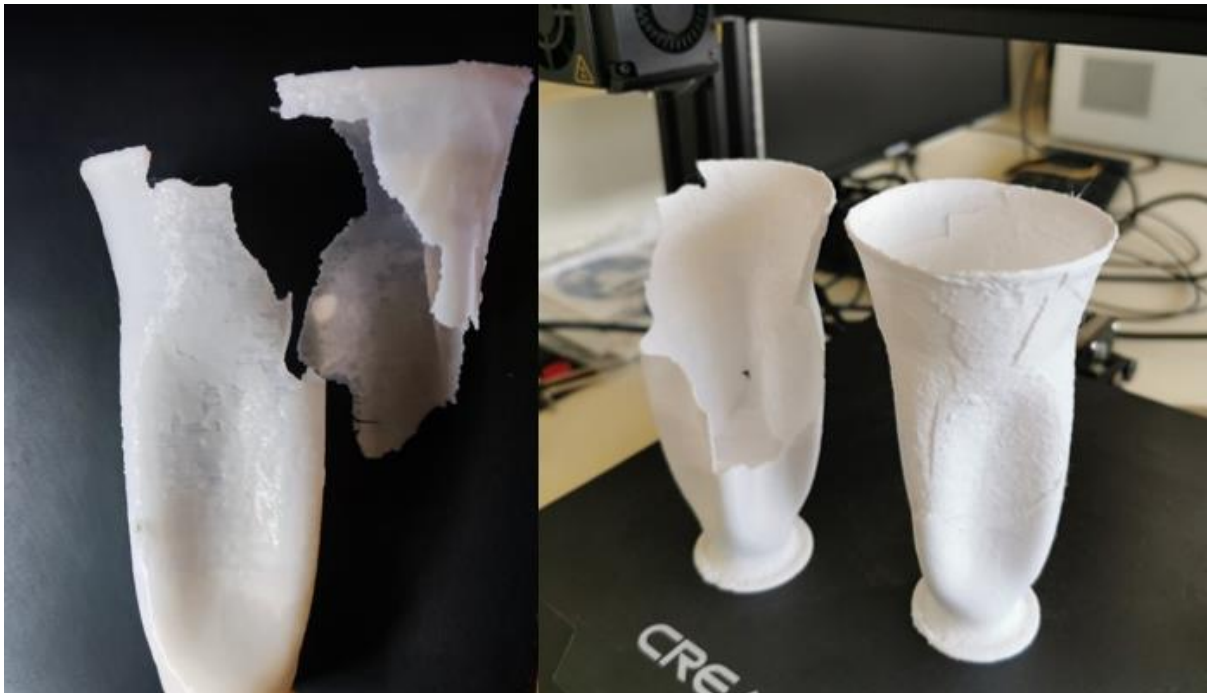
Το επόμενο βήμα μετά την παρατήρηση των προσομοιώσεων, εάν όλοι οι παράμετροι παρουσιάζονται όπως επιθυμούμε το μοντέλο είναι έτοιμο πλέον σε κώδικα μηχανής (g-code) και μπορούμε να το μεταφέρουμε στο τρισδιάστατο εκτυπωτή. Ακολουθούν ενδεικτικές εικόνες που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα των προϊόντων που δημιουργήθηκαν.



Εικόνα 95 Κομμάτι συμπλήρωσης του αγγείου



Εικόνα 96 Ακριβές αντίγραφο του μασμένου γυάλινου κυπέλου.



Εικόνα 97 Αντίγραφο του γυάλινου κυπέλου μαζί με το κομμάτι συμπλήρωσης στα αριστερά. Το σπασμένο αντίγραφο του γυάλινου κυπέλου μαζί με την αναπαράσταση του συμπληρωμένου κυπέλου στα δεξιά.

5. Συμπεράσματα:

Οι εφαρμογές της τρισδιάστατης απεικόνισης (3D scanning) καθώς και της τρισδιάστατης αναπαράστασης (3D Printing), παρουσιάζουν σπουδαίες προοπτικές στον τομέα της συντήρησης και της αναπαλαίωσης αντικειμένων πολιτισμικής κληρονομιάς. Στην σύγχρονη εποχή που διανύουμε παρουσιάζεται αναγκαία η δράση ψηφιοποίησης κάθε αντικειμένου, χώρου, κτηρίου και οποιοδήποτε αλλού στοιχείου που χαρακτηρίζεται από πολιτιστική αξία. Με την ψηφιοποίηση ενός αντικειμένου πολιτιστικής κληρονομιάς αυξάνουμε την αίσθηση ασφαλείας όσο αφορά την διατήρηση του στην πάροδο του χρόνου, δημιουργώντας πολλαπλά ψηφιακά αντίγραφα τα οποία αποθηκεύονται σε ξεχωριστές τοποθεσίες. Επιπρόσθετα, με την τρισδιάστατη απεικόνιση και την δημιουργία ενός ακριβούς αντίγραφου εμφανίζεται η δυνατότητα δημιουργίας ενός νέου αντιγράφου του εκθέματος το οποίο μπορεί να κατασκευαστεί με πολλές τεχνικές. Κάποιες από αυτές, αποτελούν οι τεχνικές προσθετικής κατασκευής που παρουσιάσαμε σε αυτή την εργασία. Το αντίγραφο αυτό που θα δημιουργηθεί, έχει την δυνατότητα να αντικαταστήσει το πρωτότυπο το οποίο βρίσκεται προς έκθεση και με την σειρά του το πρωτότυπο να μεταφερθεί σε χώρο στον οποίο θα εκτίθεται όσο το δυνατόν λιγότερο σε συνθήκες διάβρωσης, διατηρώντας το αυτούσιο και ασφαλή για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της λύσης αυτής αποτελούν τα αγάλματα των Καρυάτιδων στο μουσείο της ακρόπολης. Τα αυθεντικά αγάλματα έχουν τοποθετηθεί στον εσωτερικό χώρο του μουσείου στον οποίο δεν εκτίθονται στις εξωτερικές συνθήκες, ενώ στην θέση τους, στον βράχο της ακρόπολης, έχουν τοποθετηθεί αντίγραφα.

Γενικότερα, κατά την έρευνα που διεξαχθεί στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας αντιλαμβανόμαστε πώς ο συνδυασμός των δύο τεχνολογιών, "3D Scanning" και "3D printing" μπορεί να προσφέρει αξιοθαύμαστη βοήθεια στο έργο των συντηρητών, όταν τα ευρήματα που συναντούν δεν είναι πλέον αυτούσια, αλλά τμήματα τους έχουν χαθεί ή καταστραφεί με τα χρόνια. Αδιαμφισβήτητο παράδειγμα αποτελεί το πειραματικό μέρος της εργασίας που αποδεικνύει πώς σε μικρά και εύθραυστα πολιτιστικά αντικείμενα που παρουσιάζουν αρετή λεπτομέρεια, η επεξεργασία τους γίνεται πλέον δυνατή. Καταλαβαίνουμε πώς η διαδικασία συμπλήρωσης του σπασμένου κομματιού του κυπέλου θα ήταν αδύνατη με τις παραδοσιακές τεχνικές που ακολουθούσαν οι συντηρητές από την αρχαιότητα ως σήμερα. Καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι θα ήταν αδύνατο, καθώς όλες οι τεχνικές απαιτούσαν κάποιου ίδιου επαφή με το πρωτότυπο έκθεμα για να οδηγηθούν στο τελικό κομμάτι συμπλήρωσης. Με τον συνδυασμό των τεχνολογιών μπορούμε γρήγορα, να δημιουργήσουμε ένα λεπτομερές αντίγραφο του αρχικού σπασμένου πρωτοτύπου και να δοκιμάσουμε όλους του πειραματισμούς του κομματιού συμπλήρωσης σε αυτό.

Εν κατακλείδι, η τεχνολογία της τρισδιάστατης σάρωσης με το μεγάλο φάσμα διαφορετικών τεχνικών που εμπεριέχει, λύνει τα χέρια των επιστημόνων του τομέα της αρχαιολογίας όσο αφορά την εύρεση ενός ακριβούς ψηφιακού αντιγράφου που παρουσιάζει μέγιστη λεπτομέρεια τόσο στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, όσο και στις ακριβείς διαστάσεις του. Η τεχνολογία της προσθετικής κατασκευής και συγκεκριμένα του 3D printing δρα συμπληρωματικά στις δυνατότητες που παρέχει η τεχνολογία της ψηφιακής αποτύπωσης. Έχοντας ως σημείο αναφοράς ένα ψηφιακό μοντέλο υπερέψης ανάλυσης, έχουν την δυνατότητα να μεταλαμπαδεύσουν την ευκρίνεια αυτή σε ένα προϊόν στον πραγματικό κόσμο. Λαμβάνοντας υπόψη την συνεχή και ραγδαία ανάπτυξη που παρατηρείται ταυτόχρονα και στις δύο αυτές τεχνολογίες στις μέρες μας, καταλαβαίνουμε πώς οι δυνατότητες που παρέχουν στον τομέα της αρχαιολογίας και της συντήρησης προβλέπεται να αυξηθούν δραματικά.

6. Βιβλιογραφία

- [1] 3DPTM Laboratory, MIT, 1998-2000. Three Dimensional Printing..
- [2] André, J. M., 1976. *The restorer's handbook of ceramics and glass*.. New York: s.n.
- [3] Anon., χ.χ. www.eurotecpisa.eu. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.eurotecpisa.eu/prodotti/strumenti-misura/laser-scanner.html>
- [4] Appelbaum, B., Butterworth –Heinemann U.K. - U.S.A.. *Conservation Treatment Methodolog*. 2007: s.n.
- [5] Arnoldas, 2015. www.hubs.com. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.hubs.com/talk/t/restoring-an-ancient-roman-mask/2261>
[Πρόσβαση 2022].
- [6] B., U. & et.al., 2008. A review of process development steps for new material systems in three dimensional printing (3DP).. *Journal of Manufacturing Processes*, pp. 96-104.
- [7] Barassi, S., 2009. *Dreaming of a universal approach: Brandi's Theory of Restoration and the conservation of contemporary art*. Londo. s.l.:s.n.
- [8] Barov, Z., 1988. *The reconstruction of a Greek vase: The Kyknos Krater, Studies in Conservation*. s.l.:s.n.
- [9] Benedict, 2015. www.3ders.org. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://www.3ders.org/articles/20151228-3d-printed-replicas-of-isis-destroyed-arch-of-palmyra-to-be-erected-in-london-and-nyc.html>
[Πρόσβαση 2022].
- [10] Beraldin, J., 2004. *Integration of Laser Scanning and Close-Range Photogrammetry—The Last Decade and Beyond*.. Proceedings 20th ISPRS Congress, Istanbul, s.n.
- [11] Berman, 2012. B. 3-D Printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, pp. 155-162.
- [12] Bigliardi, G., 2014. www.3d-archeolab.it. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.3d-archeolab.it/2014/08/4-7-settembre-2014-s-martino-dallargine-mn-la-rivoluzione-dello-spazio/>
[Πρόσβαση 2022].
- [13] Boardman, J., 2006. *Η Ιστορία των Αρχαίων Ελληνικών Αγγείων, Αγγειοπλάστες, αγγειογράφοι και εικόνες*. Αθήνα: Εκδόσεις Πατάκη.
- [14] Bourell, D., 2009. *Roadmap for Additive manufacturing*. s.l.:The University of Texas at Austin Laboratory for Freeform Fabrication Advanced Manufacturing Center.
- [15] Burns, M., 1999. *Automated Fabrication*. s.l.:s.n.
- [16] Buys, S. O. V., 1996. *The Conservation and Restoration of Ceramics*. Butterworth-Heinemann: s.n.

- [17]Canellidis V, G. J. D. V., 2009. Genetic-algorithm-based multiobjective optimization of the build orientation in stereolithography.. *International Journal of Advanced Manufacturing and Technology*.
- [18]Casey, L., 2009. Prototype pronto. *Packaging Digest*, pp. 54-56.
- [19]Connan, J. N. O. J. L., 2004. *Bitumen in early ceramic art: bitumen-painted ceramics from Late Neolithic Tell Sabi Abyad (Syria)*, *Archaeometry*. s.l.:s.n.
- [20]Cronyn, J., 1990. *The Elements of Archaeological Conservation*. London – New York: s.n.
- [21]Crookes, W., 1892. *Wagner's chemical technology*. New York: D.Appleton and Co..
- [22]Curless, B., 1999. From Range Scans to 3D Models. *Computer Graphics*.
- [23]Curless, B. & M., L., 1995. *Better optical triangulation through spacetime analysis*. Πρακτικά IEEE International Conference on Computer Vision, s.n.
- [24]Dooijes R., N. P., 2007. *Ancient Repairs: Techniques and Social Meaning, Konservieren oder restaurieren: Restaurierung griechischer Vasen von der Antike bis Heute, Corpus Vasorum Antiquorum*. Munich: C.H. Beck.
- [25]Dooijes, R. B. F. D. M. N., 2007. Restorations on the Late Uruk Pottery from Jebel Aruda - old and new. *Leiden Journal of Pottery Studies* , pp. 61-77.
- [26]Dooijes, R. N. P., 2008. *Ancient repairs in archaeological research: a Near Eastern perspective, Proceedings of the symposium "Holding it all together"*. London, British Museum : s.n.
- [27]Engineers Handbook, 2004-2006. *Rapid Prototyping -- Solid Ground Curing..* s.l.:s.n.
- [28]FARIN, G., 1993. *Curves and surfaces for Computer Aided Geometric Design..* 3η Έκδοση επιμ. San Diego: Academic Press Professional, Inc.
- [29]Favaro, P., 2002. *hape from Focus/Defocus*. Washington University Department of Electrical Engineering Electronic Signals and Systems Research: s.n.
- [30]Feilden, B., 1979. An Introduction to Conservation of Cultural Property, united Nations educational. *scientific and cultural organization*, pp. 24-48.
- [31]Garachon, I., 2010. *Old Repairs of China and Glass*. s.l.:The Rijksmuseum Bulletin.
- [32]Giannatsis J, D. V., 2007. Decision support tool for selecting fabrication. *International Journal of Advanced*, p. 707–717.
- [33]Guy Godin, M. R. J. B., Marc, L., Luc, C. & Francois, B., 2001. *Anassessment of laser range measurement on marble surfaces*. Austria, 5th Conference on Optical 3D Measurement Techniques.
- [34]Hertzmann, A. & Seitz, S. M., 2003. *Shape and Materials by Example: A Photometric Stereo Approach*. Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, s.n.

- [35]Horie, C., 1998. *Materials for Conservation: Organic consolidants, adhesives and coatings*, Architectural Press, Butterworth-Heinemann. Great Britain: s.n.
- [36]J.Vass, και συν., 2008. Avoidance of speckle noise in laser vibrometry by the use of kurtosis ratio: Application to mechanical fault diagnostics. Στο: *Mechanical Systems and Signal Processing*. s.l.:s.n.
- [37]JOE, F., 2012. *www.wired.com*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.wired.com/2012/12/harvard-3d-printing-archaeology/>
[Πρόσβαση 2022].
- [38]Kantaros A, K. D., 2013. Fiber Bragg grating based investigation of residual strains in ABS parts fabricated by fused deposition modeling process.. *Materials and Design*, p. 44–50.
- [39]Kim Pileun, J. C. Y. K. C., 2018. SLAM-driven robotic mapping and registration of 3D point clouds.
- [40]Koob, S., 1984. *The continued use of shellac as an adhesive: Why? Adhesives and consolidants, preprints of the contributions to the Paris congress..* London: s.n.
- [41]Koob, S., 1998. Obsolete Fill Materials Found on Ceramics. *Journal of the American Institute for Conservation*, p. 49–67.
- [42]Kumar P, A. I. S. R., 2012. Application of fusion deposition modelling for rapid investment casting – a review.. *International Journal of Materials Engineering Innovation*, pp. 204-227.
- [43]Kumar, 2003. Selective laser sintering: A qualitative and objective approach.. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*.
- [44]L., W. & et.al, 2004. *Laminated Object Manufacturing (LOM) of SiSiC Composites. Advanced Engineering Materials*. s.l.:s.n.
- [45]Lanmon, D. P., 1969. *Putting the Pieces Together: Ceramics and Glass Repairing in the Eighteenth and Nineteenth Centuries*. s.l.:s.n.
- [46]Materialise NV, 2015. *FDM: Materials & datasheets..* [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://manufacturing.materialise.com/fdm-materials-datasheets-0>
[Πρόσβαση 18 Σεπτεμβρίου 2022].
- [47]Melchels F.P.W, F. J. G. D., 2010. *A review on stereolithography*, s.l.: s.n.
- [48]Mueller B, K. D., 1999. Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry. *Computers in Industry*, p. 47–53.
- [49]P., G. & et.al., 2001. Quality Analysis and Optimization of Solid Ground Curing Process.. *Journal of Manufacturing Systems*, pp. 250-263.
- [50]P.M., P. & et.al, 2012. Stereolithography: Potential Applications in Forensic Science.. *Research Journal of Engineering Sciences*, pp. 47-50.

- [51]Park J, T. M. H. H., 2000. Characterization of the laminated object manufacturing (LOM) process.. *Rapid Prototyping Journal*, p. 36 – 50.
- [52]Rathgen, F., 1905. The preservation of antiquities. *Cambridge University Press*, pp. 87-88.
- [53]Schechner, Y. Y., 2000. Depth from Defocus vs. Stereo: How different really are they?. *International Journal of Computer Vision* , pp. 141-162.
- [54]Stetz, K., 2009. *Solid Ground Curing (SGC) Rapid prototyping study*. s.l.:s.n.
- [55]Taimisto, 2009. *Bachelor's thesis: Process parameters in laser sintering process*, s.l.: s.n.
- [56]Thomas Supplier Discovery, 2022. *thomasnet.com*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/all-about-multi-jet-modeling-mjm-3d-printing/>
[Πρόσβαση 20 Σεπτέμβρη 2022].
- [57]Thornton, J., 1991. *Minding the gap: Filling losses in gilded and decorated objects*. In *Gilding and surface decoration*. London: s.n.
- [58]Thornton, J., 1998. A Brief History and Review of the Early Practice and Materials of Gap-Filling in the West. *Journal of the American Institute for Conservation* , pp. 3-22.
- [59]Valentina Di Donato, L. S.-M., 2017. *cnn.com*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: <http://edition.cnn.com/2017/02/17/europe/palmyra-treasures-restored-isis/index.html>
[Πρόσβαση 2022].
- [60]Wikipedia, 2022. *Wikipedia.org*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Solid_ground_curing
[Πρόσβαση 20 Σεπτέμβρη 2022].
- [61]Wikipedia, χ.χ. *wikipedia.org*. [Ηλεκτρονικό]
Available at: https://en.wikipedia.org/wiki/Fused_filament_fabrication#Fused_deposition_modeling
- [62]Yan X, G. P., 1996. *A review of rapid prototyping technologies and systems*.. s.l.:s.n.
- [63]Zhang, R., Tsai, P.-S., Cryer, J. E. & Shah, M., 1999. *Shape from Shading: A Survey,IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. s.l.:s.n.
- [64]Αλεξίου, Κ., 2008. *Συμπλήρωση αποθηκευτικού πύθου πρώιμης εποχής του χαλκού με την τεχνική της περιστροφής - τραβηχτό καλούπι*. Αθήνα, Πανελλήνια Ένωση Συντηρητών.
- [65]Γεωργάκη, Α., 2012. *Αποκατάσταση Αγγείων της Αρχαιότητας: Ζητήματα Αισθητικής*. Θεσσαλονίκη: s.n.
- [66]Γεωργάκη, Α., 2012. *Αποκατάσταση Αγγείων της Αρχαιότητας: Ζητήματα Αισθητικής και Δεοντολογίας από τη Διεθνή και Ελληνική Μουσειακή Εμπειρία*, Θεσσαλονίκη: s.n.

- [67]Λαμπρόπουλος, Β., 1996. *Κεραμικά: Τεχνολογία, Διάβρωση & Συντήρηση*. Αθήνα: s.n.
- [68]Λαμπρόπουλος, Β. Μ. Χ., 1993. *Πορσελάνη, Τεχνολογία Διάβρωση και Συντήρηση*. Αθήνα : s.n.
- [69]Παυλίδης, Γ., Σεβελίδης, Β. & Χαραλαμπίδου, Μ., 2014. Τεχνικές βέλτιστης ψηφιοποίησης και μοντελοποίησης εκθεμάτων και χώρων. Στο: *Μέθοδοι τρισδιάστατης ψηφιοποίησης αντικειμένων και χώρων*. ΑΘΗΝΑ: s.n.
- [70]Συμεωνίδης, Π., 2007. *Σαρωτές Laser. Τεχνολογία, τεχνικές και εφαρμογές*. Σέρρες : s.n.